

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 50

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2025

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
educational institution
«PRIAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***REPORTER
OF THE PRIAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 50

Section: Technical sciences

Dnipro, 2025

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2025. Вип. 50. 307 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025>.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій. Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Іщенко А.О.

Angeliki G. Lekatou

**Hossam Ahmed Mohamed
Halfa**

Sergey Edward Lyshevski

Dmytro Makarchuk

Oleksandr Vrublevskiy

Азархов О.Ю.

Белоконь К.В.

Білоусов Є.В.

Булгаков М.П.

Бялобржеський О.В.

Головань А.І.

Грицук І.В.

Губинський М.В.

Єфременко В.Г.

Кириллова О.В.

Клецька О.В.

Ковалевська О.С.

Кухар В.В.

Лук'яненко А.О.

Мазур В.О.

Маменко П.П.

Онищенко О.А.

Парфененко Ю.В.

Петренко Т.Г.

Плахтій О.А.

Позорлецький Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пятикоп О.Є.

Саєнко Ю.А.

Симоненко Р.В.

Сілі І.І.

Тарандушка А.А.

Твердомед В.М.

Ткачов В.В.

Худяков І.В.

Чабак Ю.Г.

Чеберячко Ю.І.

Чупринов Є.В.

Шумило О.М.

Савенко О.С.

Сорокіна М.Є.

головний редактор, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece

Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt

Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA

PhD, Solent University, Southampton, UK

Dr., PhD, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn, Poland

д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет, Україна

д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія, Україна

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, Україна

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, Україна

д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, проф., Національна металургійна академія України, Україна

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

канд. техн. наук, доц., Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

д-р техн. наук, проф., «Технічний університет «Метінвест Політехніка»,

Україна

канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Національної академії наук України, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

доктор філософії, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, проф., НУ «Одеська морська академія», Україна

канд. техн. наук, доц., Сумський державний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Україна

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Україна

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Національний транспортний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., Державний університет інфраструктури та техно-

логій, Україна

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

канд. техн. наук, доц., Державний університет економіки і технологій, Україна

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, Україна

відповідальний секретар, канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

коректор, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Адреса: ДВНЗ «ПДТУ», проспект Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

E-mail: vestnik.pgtu@gmail.com, vestnik_pgtu@pstu.edu (для надсилання статей).

Ідентифікатор в Реєстрі суб'єктів у сфері друкованих медіа – R30-02289, згідно з рішенням Нацради України з питань телебачення і радіомовлення від 21.12.2023 № 1821. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020. Видається два рази на рік.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 6 від 30.06.2025 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2025

ЗМІСТ

CONTENTS

Вітальне слово ректора ДВНЗ «ПДТУ», доктора економічних наук, професора Хаджинової Олени Вікторівни до читачів збірника

8

Welcome address from the rector of the SHEI «PSTU», Dr. Sc., professor Olena V. Khadzhynova to the readers of the journal

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

Вичужанін В., Вичужанін А.

Модель визначення подібності між прецедентами для діагностики відмов обладнання суднової енергетичної установки

9

V. Vychuzhanin, A. Vychuzhanin

Model for determining similarity between cases in failure diagnosis of ship power plant equipment

Клюшник В.В., Чернецький Є.В., Онищенко О.В.

Ідентифікація трафіку мереж передачі даних у реальному часі

18

V.V. Klyushnyk, E.V. Chernetskyi, O.V. Onishchenko

Identify data network traffic in real time

Федосова І.В., Проніна О.І., Веремій В.О.

Моделювання та реалізація багаторівневого адаптивного тестування у інтелектуальній системі

25

I.V. Fedosova, O.I. Pronina, V.O. Veremiy

Modeling and implementation of multi-level adaptive testing in an intelligent system

Балалаєва О.Ю., Марченко І.Ф., Браткевич В.П., Соколова Н.О., Дереза А.Ю.

Розробка мобільного додатка на основі штучного інтелекту для зменшення харчових відходів та покращення якості життя населення

31

O. Balalaieva, I. Marchenko, V. Bratkevych, N. Sokolova, A. Dereza

Development of a mobile application based on artificial intelligence to reduce food waste and improve the quality of life of the population

Неня А.В., Нестеров О.О., Бузнік О.О.

Стан розвитку інформаційних технологій підтримки прийняття рішення в управлінні людськими ресурсами

40

A. Nenya, O. Nesterov, O. Buznik

The state of development of information technology decision-making support in management human resources

Єлфімов Д.С., Воротнікова З.Є.

Приклади проектування документоорієнтованої бази даних в MongoDB

50

D. Yelfimov, Z. Vorotnikova

Examples of designing a document-oriented database in MongoDB

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

APPLIED MECHANICS

Стоєпник О.В., Кабат О.С., Ведь В.В.

Вплив зазору на залишкові напруження та якість вальцьованих з'єднань труба-трубна дошка

61

O.V. Stovpnyk, O.S. Kabat, V.V. Ved'

Effect of clearance on residual stress and quality in rolled tube-tubesheet connections

Карпенко Т.М., Шишкін В.В.

До питання щодо виникнення автоколивань різця металорізального верста-
ту

76

T.M. Karpenko, V.V. Shishkin

On the issue of the occurrence of self-oscillations of a metal-cutting machine tool cutter

Рой С.В., Яготін В.О., Прокопов А.Є., Рябов Є.С.

Вибір приводу колісних пар локомотиву для промислового залізничного транспор-
ту

84

S.V. Roi, V.O. Yagotin, A.E. Prokopov, Ie.S. Riabov

Choice of locomotive wheel pair drive for industrial rail transport

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

Іщенко А.О., Девін Л.М., Рассохін Д.О., Носовська О.В., Капустін С.В., Бем Р.

Порівняльний аналіз характеристик міцності вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі

96

A.O. Ishchenko, L.M. Devin, D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska, S.V. Kapustin, R. Böhm

Comparative analysis of strength characteristics of domestic composite materials based on polyurethane

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

Тимошенко Д.О., Кухар В.В., Навольнев І.Ю., Малий Х.В., Бутурлін О.С.

Стратегічна модернізація ПАТ «Запоріжсталь» для декарбонізації та адаптації до вимог CBAM

103

D.O. Tymoshenko, V.V. Kukhar, Ig.Yu. Navolniev, Kh.V. Malii, O.S. Buturlin

Strategic modernization of PJSC «Zaporizhstal» for decarbonization and adaptation to CBAM requirements

Чупринов Є.В., Кассім Д.О., Ляхова І.А., Зайцев Г.А., Реков Ю.В.

Дослідження процесу агломерації при забезпеченні внутрішнього джерела теплоти та оптимізації теплової картини по висоті шару

111

Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim, I.A. Liakhova, G.L. Zaitsev, Yu.V. Rekov

Research of the agglomeration process while providing an internal heat source and optimization of the thermal pattern along the height of the layer

Крячко Г.Ю., Сігарьов Є.М.

Доменна плавка під тиском і збагачення дуття киснем – інтенсифікатори процесу чи необґрунтована данина традиціям

117

G.Yu. Kryachko, Ye.M. Sigarev

Pressure blast melting and blow enrichment with oxygen – process intensifiers or an unfounded tribute to traditions

Плотніков В.В., Бабаєвська О.В., Савельєв С.Г., Бабошко Д.Ю., Чубенко В.А.

Комплексна технологія виробництва чорних металів із застосуванням низькотемпературної плазми

125

V.V. Plotnikov, O.V. Babaievskaya, S.G. Saveliev, D.Yu. Baboshko, V.A. Chubenko

Integrated technology for ferrous metal production using low-temperature plasma

Дан Л.О., Трофімова Л.О., Грек К.Р.

Обґрунтування можливостей покращення енергоефективності процесу плавлення металу в електродугових печах

134

L. Dan, L. Trofimova, K. Grek

On the possibility of improving the energy balance of melting in electric arc furnaces

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

**Якимець С.М., Ходаковський М.С.,
Олійніченко М.Ю., Чорна В.О.**
Оцінка потенціалу джерел відновлюва-
ної енергетики в умовах залізрудних
підприємств

140

**S.M. Yakymets, M.S. Khodakovskiy,
M.Yu. Oliynichenko, V.O. Chorna**
Assessment of the potential of renewable
energy sources in the conditions of iron-
mining enterprises

Ялова А.М., Бондар Н.В., Яловий О.О.
Підходи до забезпечення стійкості енер-
гетичної системи в процесі інтеграції
відновлюваних джерел енергії

154

A. Yalova, N. Bondar, O. Yalovoy
Approaches to ensuring the stability of the
energy system in the process of integration
of renewable energy sources

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

HEAT POWER ENGINEERING

Дульський А.І., Сірий О.А.
Дослідження робочого процесу водотру-
бно-димогарних котлів при роботі на бі-
огазі

164

A. Dulskiy, O. Siryi
Research of the working process of water-
tube/fire-tube boilers operating on biogas

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**AUTOMATION AND COMPUTER-
INTEGRATED TECHNOLOGIES**

Поливода В.В., Поливода О.В.
Проектування розподілених автомати-
зованих суднових систем керування на
базі технології OPC UA

174

V.V. Polyvoda, O.V. Polyvoda
Design of distributed automated ship's
control systems based on OPC UA technol-
ogy

Мірошніченко С.О., Вовна О.В.
Багатофакторний статистичний ана-
ліз успішності замовлень як інстру-
мент оптимізації автоматизованих си-
стем керування ресурсами

182

S.O. Miroshnychenko, O.V. Vovna
Multifactor statistical analysis of order
success as a tool for optimization of auto-
mated resource planning and control sys-
tems

Сіманенков А.А., Самойлов С.О.
Симбіоз штучного інтелекту і систем
керування судновою електроенергети-
чною установкою: сучасне та майбут-
нє

191

A.L. Simanenkov, S.O. Samoilov
Symbiosis of artificial intelligence and
ship's automated electrical energy sys-
tems: present and future

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**ENVIRONMENTAL PROTECTION
TECHNOLOGY**

**Цопа В.А., Дерюгін О.В.,
Забеліна В.А., Чеберячко Л.М.**
Визначення тяжкості наслідків вибуху
пального на автозаправної станції

200

**V. Tsopa, O. Deryugin,
V. Zabelina, L. Cheberiachko**
Determining the severity of the conse-
quences of a fuel explosion at a gas station

Волошин В.С., Бурко В.А.

Застосування фрактально-кластерної теорії управління матеріальними ресурсами для оцінки умов мінімізації промислових відходів у джерелі їх виникнення – узагальненому технологічному процесі

210

V.S. Voloshyn, V.A. Burko

Application of fractal-cluster theory of material resources management to assess the conditions for minimizing industrial waste at the source of their occurrence – a generalized technological process

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

**Погорлецький Д.С., Грицук І.В.,
Худяков І.В., Самарін О.Є.,
Носов П.С.**

Підвищення ефективності експлуатації вантажної системи нафтоналивного судна

218

**D.S. Pohorletskyi, I.V. Gritsuk,
I.V. Khudiakov, O.E. Samarin,
P.S. Nosov**

Improving the efficiency of operation of the cargo system of an oil tanker vessel

Долинська Н.Б., Калініченко Є.В.

Цифрові технології відстеження та супроводження суден на внутрішніх водних шляхах

226

N.B. Dolynska, Ye.V. Kalinichenko

Digital technologies for tracing and tracking vessels on inland waterways

Никитюк П.В., Мельник О.М.

Інтегрована модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна в умовах динамічного середовища

235

P. Nykytyuk, O. Melnyk

Integrated model of assessment and adaptive management of operational safety of a sea vessel in a dynamic environment

Агєєв М.С.

Забезпечення надійності суднових технічних засобів при відновленні деталей газополум'яневим напленням

247

M.S. Ahieiev

Ensuring the reliability of vessel equipment during the restoration of parts by gas flame spraying

Гончарук І.П.

Перспективні напрями підвищення енергетичної та екологічної безпеки засобів водного транспорту

254

I.P. Honcharuk

Perspective directions for improving the energy and environmental safety of water transport means

Науменко А.В., Капочкіна М.Б.

Методичне підґрунтя оптимізації проектування днопоглиблення в районах акваторій і суходолу

264

A. Naumenko, M. Kapochkina

Methodological basis for the optimization of the design of bottom deepening in aquatorial and dryland regions

Гудирева О.М.

Сучасні методи наукових досліджень у системі підготовки наукових кадрів Херсонської державної морської академії

277

E.M. Gudyreva

Modern methods of scientific research in the system of training scientific staff of the Kherson state maritime academy

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

RAILWAY TRANSPORT

**Фомін О.В., Терещук М.П.,
Лісничий В.С., Черкашин О.П.**

Проведення технічного діагностування металоконструкцій спеціального самохідного рухомого складу та основні типи невідповідностей, що виявляються

288

**O. Fomin, M. Tereshchuk,
V. Lisnychiy, O. Cherkashin**

Conducting technical diagnostics of metal structures of special self-propelled rolling stock and the main types of detected incompatibilities

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
(ЗА ВИДАМИ)**

**TRANSPORT TECHNOLOGIES
(BY TYPES)**

Шарко О.В., Мовчан П.В.

Моделювання інформаційної архітектури та інформаційного забезпечення транспортних перевезень в умовах невизначеності

297

O. Sharko, P. Movchan

Modeling of information architecture and information support of transportation in conditions of uncertainty

ВІТАЛЬНЕ СЛОВО РЕКТОРА ДВНЗ «ПДТУ», ДОКТОРА ЕКОНОМІЧНИХ НАУК, ПРОФЕСОРА ХАДЖИНОВОЇ ОЛЕНИ ВІКТОРІВНИ ДО ЧИТАЧІВ ЗБІРНИКА

Шановні колеги!

Маю за честь звернутися до Вас із щирим вітанням і представити ювілейний 50-й випуск збірника наукових праць «Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки». Цей випуск є особливим, оскільки приурочений до 30-річчя з дня заснування збірника.

Свою історію видання розпочало 10 квітня 1995 року. Цьому передував вагомий науковий прорив у стінах університету: формування наукових шкіл, наявність досвідчених науковців, потужної поліграфічної бази та бажання ділитися результатами досліджень зі світом.

З 1997 року видання було офіційно включено до переліку фахових видань, а з 2020 видання віднесено до категорії «Б».

Тематика збірника охоплює різноманітні напрями технічних наук – інженерію, автоматизацію, енергетику, металургію, матеріалознавство, біомедичну інженерію, комп'ютерні науки, електроніку, транспорт, технології захисту навколишнього середовища тощо. Така різноплановість дозволяє об'єднати фахівців із різних куточків України та світу і сприяє міждисциплінарному обміну ідеями.

За роки існування опубліковано більше 2500 статей. В них – результати фундаментальних досліджень, практичні розробки та ідеї, що поступово формують сучасний технічний ландшафт як в Україні, так і за її межами.

У складі редколегії збірника – відомі висококваліфіковані вчені, серед яких – науковці з провідних університетів України, Великої Британії, США, Греції, Єгипту, Польщі. Таке представництво дозволяє постійно підтримувати високий рівень рецензування і підтверджувати авторитет серед наукової спільноти.

Як і вся наукова спільнота, видання у 2022 році зіткнулося з повномасштабною агресією та військовими діями. Попри надзвичайно складні обставини, редакційна колегія не лише зберегла регулярність випуску збірника двічі на рік, але й забезпечила публікацію близько 150 наукових статей. Це дає всі підстави стверджувати: п'ятдесятий випуск – лише чергова віха в розвитку збірника!



З повагою,
Олена Хаджинова

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 004:37:001:62

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336233

MODEL FOR DETERMINING SIMILARITY BETWEEN CASES IN FAILURE DIAGNOSIS OF SHIP POWER PLANT EQUIPMENT

Vychuzhanin V. D.Sc. (Engineering), professor, Odesa Polytechnic National University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6302-1832>, e-mail: v.v.vychuzhanin@op.edu.ua;

Vychuzhanin A. PhD (Computer science), associate professor, Odesa Polytechnic National University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8779-2503>, e-mail: vychuzhanin.o.v@op.edu.ua

Modern ship power plants (SPPs) are high-tech systems that involve the continuous collection and analysis of large volumes of diagnostic data. Improving the efficiency of technical operation of such systems requires the development of intelligent diagnostic tools capable of accurate recognition and interpretation of typical failures. This paper addresses the problem of assessing similarity between cases within the framework of Case-Based Reasoning (CBR), which is a relevant approach under conditions of limited training data and high variability of failures. A comprehensive review of current similarity assessment methods is provided, including metric-based approaches, aggregation operators (e.g., Choquet integral), logic-based inference systems, and semantic graph models. The main limitations of these methods are identified, such as low adaptability to heterogeneous data, poor interpretability, and strong dependence on a priori knowledge. The authors propose a unified similarity assessment model that accounts for the heterogeneity of diagnostic features. The model integrates different similarity metrics – Euclidean, cosine, and Jaccard – depending on the type of data (numerical, categorical, or multi-valued). The diagnostic significance of features is represented by weight coefficients, which are optimized using numerical methods. The paper also presents a formal description of the case structure, a classification of typical failures, and an algorithm for matching based on the operational context. The proposed approach ensures interpretability, adaptability, and scalability of the model, confirming its applicability in intelligent decision support systems for failure diagnosis of SPP equipment. Practical implementation of the model can significantly enhance the reliability, safety, and efficiency of marine systems operation.

Keywords: intelligent decision support systems, ship power plant, equipment failure, case, Case-Based Reasoning, case similarity, metric, interpretability.

Statement of the problem

In modern complex technical systems (CTS), timely and accurate fault diagnosis of equipment plays a key role in ensuring uninterrupted operation, safety, and high performance. The increasing complexity and heterogeneity of such systems have led to the widespread adoption of intelligent fault diagnosis methods based on knowledge reuse, among which Case-Based Reasoning (CBR) stands out in particular. Diagnosis using CBR involves comparing the current situation with previously encountered cases, with the effectiveness of this approach largely depending on the accuracy of similarity assessment between cases.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Similarity assessment between cases is a key task in CBR systems, as it directly affects the relevance of the retrieved solutions. Modern approaches range from traditional metrics to machine learning and logic-based models, but they face challenges related to scalability, interpretability, and adaptability to heterogeneous data [1]. For instance, Neykov and Stefanova [2] highlighted the

flexibility of rule-based heuristics but noted difficulties in scaling and tuning weights. Chen et al. [3] applied graph neural networks to detect structural similarities, but pointed out their low transparency and complex preprocessing. The use of the Choquet integral for feature aggregation was proposed in [4], though it complicates the formalization of expert preferences. In [5], Ye introduced neutrosophic logic with cotangent-based similarity measures to handle uncertainty, yet interpretability remained an issue. Time series analysis methods such as Dynamic Time Warping demonstrated robustness to distortions [6], but suffer from high computational complexity and limited semantic sensitivity. Adaptive fuzzy systems (El Bitar et al. [7]) have shown resilience to noise but remain limited in industrial validation across diverse datasets.

Traditional approaches insufficiently account for probabilistic fault dependencies, operational conditions, and degradation dynamics. Therefore, there is a need to develop an adaptive and unified similarity assessment methodology capable of effectively comparing fault cases – particularly in the context of ship power plants (SPPs) – by incorporating probabilities, semantics, and operational conditions.

Purpose and task statement

The aim of this study is to develop a unified and adaptive methodology for assessing the degree of similarity between equipment failure cases within SPPs. This methodology should integrate metric and probabilistic approaches, handle heterogeneous data, and ensure result interpretability for subsequent implementation in intelligent CBR-based diagnostic systems.

The methodology should be based on a similarity metric capable of effectively matching new failures with archived cases and identifying the most relevant analogs. It must take into account both quantitative and qualitative characteristics of failures, support the integration of metric, logical, and learning-based components, and operate with heterogeneous data – including symbolic, numerical, and time-series formats. Interpretability of results for experts and adaptability of the methodology to changing operating conditions of SPPs are also essential.

Summary of the main material

To develop a formalized model for determining the similarity between cases, it is first necessary to structure information about typical failures of SPP equipment [8, 9] and the corresponding diagnostic features. Table 1 presents a classification of failures based on key parameters – temperature, vibration level, pressure, and typical manifestations. This structure makes it possible to identify diagnostically significant features, which are further formalized as case parameters.

To establish the relationship between features and failure types, three scenarios can be identified. Failure A (bearing overheating) is associated with prolonged load, accompanied by an increase in temperature and vibration. Failure B (hydraulic shock in the cooling system) occurs during abrupt mode changes due to unstable pressure and temperature. Failure C (injector defect) is characterized by reduced fuel pressure and unstable engine operation. These examples demonstrate that comprehensive parameter

analysis allows for accurate differentiation of failure types and identification of their causes. In the tasks of diagnosing failures in CTS, including SPP, the model of case representation and comparison is a key element of intelligent decision support. Traditionally, similarity between cases is evaluated using Euclidean and Manhattan distances in feature spaces based on the numerical representation of failure parameters [10, 11]. Some studies also consider categorical features, but often without adapting the metrics to their nature [12]. More advanced approaches suggest the use of ontologies or logical representations [13]; however, these require complex verification and are not always robust to incomplete data. The model proposed in this study differs from existing approaches in several key aspects. First, it employs specialized metrics tailored to the type of diagnostic parameter: Euclidean distance for numerical features, cosine similarity for categorical features, and Jaccard distance for multiple-value features, ensuring adequate similarity evaluation. Second, the model incorporates a weighting system that reflects the diagnostic significance of each feature, thereby improving the accuracy and interpretability of the results. Third, it allows for weight optimization using numerical methods, which enables adaptation of the model to real expert assessments and empirical data. Finally, the model is designed to operate with limited training samples, which is particularly important under SPP operational conditions, where the number of recorded failure cases is limited, and the data may be incomplete or heterogeneous.

The overall similarity measure between two cases A and B is defined as a weighted sum of individual similarity coefficients.

For two cases $A_i = (x_1, \dots, x_n)$ and $B_i = (y_1, \dots, y_n)$, the similarity $S_i(A, B)$ is calculated using the formula [14]:

$$S(A, B) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \text{sim}_i(A_i, B_i), \quad (1)$$

where $\text{sim}_i(A_i, B_i) \in [0, 1]$ – is the partial similarity measure for the i -th feature, and ω_i is the weight of the i -th parameter.

Classification of typical failures and diagnostic features

Table 1

Failure Type	Temperature	Vibration	Pressure	Typical Symptoms
Failure A	>90°C	2.0–3.5 mm/s	>10 bar	Often associated with cooling system overheating
Failure B	75–85°C	1.5–2.5 mm/s	6–9 bar	Related to gradual bearing wear
Failure C	>85°C	2.5–4.0 mm/s	9–11 bar	Observed with unstable fuel supply

The partial similarity functions are defined as follows:

Absolute Difference Similarity (for numerical features normalized to [0,1]):

$$sim_i(A_i, B_i) = \frac{|A_i - B_i|}{\max(A_i) - \min(A_i)}$$

Cosine Similarity (for categorical features, such as failure type, encoded using one-hot encoding) [15]:

$$sim_{i.cos}(A_i, B_i) = \frac{A_i^{\rightarrow} \cdot B_i^{\rightarrow}}{\|A_i^{\rightarrow}\| \cdot \|B_i^{\rightarrow}\|}$$

Euclidean Similarity (for normalized numerical parameters, such as failure probability or risk category) [16, 17]:

$$sim_{i.euc}(A_i, B_i) = 1 - |A_i - B_i|$$

Jaccard Similarity (for set-based features, e.g., failure subsystems) [18]:

$$sim_{i.euc}(A_i, B_i) = \frac{|A_i \cap B_i|}{|A_i \cup B_i|}$$

For practical implementation in the context of ship engine unit (SEU) diagnostics, the following specification of the similarity measure is used. The formal definition of similarity between cases is implemented using the k-nearest neighbors (k-NN) method, which calculates the similarity between cases. The parameter weights are optimized to reflect their relative importance:

$$S(A, B) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot d_i(A_i, B_i), \quad (2)$$

where ω_i – weight of the i -th parameter;

$d_i(A_i, B_i)$ – dissimilarity measure of the i -th parameter between cases A_i and B_i ;

n – total number of parameters

To improve diagnostic accuracy, the case base is regularly updated and optimized. The case similarity is calculated as follows:

$$S(A_i, B_i) = \alpha_{s,i} \cdot d_{types,i}(A_i, B_i) + \beta_{s,i} \cdot d_{probability,i}(A_i, B_i) + \gamma_{s,i} \cdot d_{components,i}(A_i, B_i), \quad (3)$$

where $d_{types,i}(A_i, B_i)$ – similarity measure of failure types;

$d_{probability,i}(A_i, B_i)$ – difference in failure probabilities;

$d_{components,i}(A_i, B_i)$ – similarity of affected components;

$\alpha_{s,i}, \beta_{s,i}, \gamma_{s,i}$ – weighting coefficients reflecting the importance of different comparison aspects.

$$d_{types,i}(A_i, B_i) = \begin{cases} 1, & \text{if the failure types are identical} \\ 0.5, & \text{if they belong to the same category,} \\ 0, & \text{if they are different} \end{cases}$$

$$d_{probability,i}(A_i, B_i) = 1 - |P(A_i) - (B_i)|,$$

$$d_{components,i}(A_i, B_i) = \frac{|C(A_i) \cap C(B_i)|}{|C(A_i) \cup C(B_i)|},$$

where $P(A_i)$ and (B_i) – are the failure probabilities of components;

$C(A_i)$ and $C(B_i)$ – are the sets of components involved in the failures. This allows for a quantitative assessment of the overlap between affected subsystems.

For normalization of the overall metric, the following is used:

$$S_{norm}(A_i, B_i) = \frac{S(A_i, B_i)}{\alpha_{s,i} + \beta_{s,i} + \gamma_{s,i}}$$

The coefficients $\alpha_{s,i}, \beta_{s,i}$ and $\gamma_{s,i}$ are selected via optimization to minimize classification error. Figure 1 shows a diagram of the influence of $\alpha_{s,i}, \beta_{s,i}$ and $\gamma_{s,i}$ on the final similarity score between precedent pairs. The number of the precedent pair is given on the x-axis.

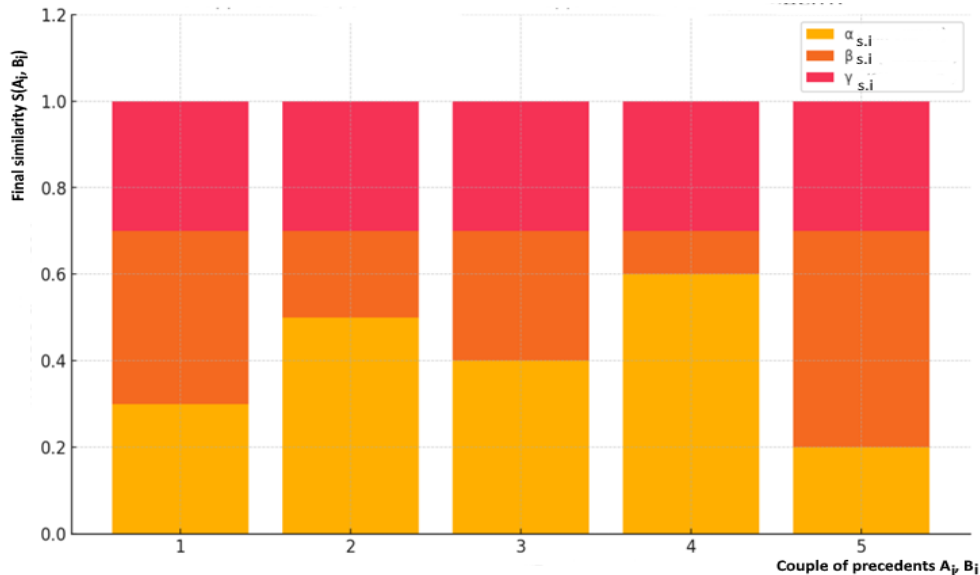


Fig. 1 – Diagram of the influence of $\alpha_{s,i}, \beta_{s,i}$ and $\gamma_{s,i}$ on the final similarity between precedents

The visualization of the components $\alpha_{s,i}$, $\beta_{s,i}$ and $\gamma_{s,i}$ in the structure of the similarity metric $S(A_i, B_i)$ illustrates their respective contributions to the overall analogy assessment between precedent pairs. The coefficient $\alpha_{s,i}$ reflects the influence of failure type: when the types match, $d_{types,i}(A_i, B_i)$ tends toward 1, amplifying the similarity score even with a moderate weight. In the case of mismatch, the influence drops significantly, which reduces the risk of false positives. The components $\beta_{s,i}$ (related to probability) and $\gamma_{s,i}$ (component overlap) provide smooth compensation in scenarios where failure types differ, enhancing both the interpretability and adaptability of the model. This structure ensures that precedent comparison remains robust to data heterogeneity. Looking ahead, it would be appropriate to integrate probabilistic inference mechanisms to account for prior probabilities and uncertainty.

Approach 1: Probabilistic weighting of parameters.

The weight w_i for a parameter can be defined as a function of the probability of occurrence of the corresponding failure:

$$w_i = f(p_i), \quad (4)$$

where p_i – prior probability of the parameter/failure

Approach 2: Extension of similarity measure through probabilities

$$S(A, B) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot sim_i(A_i, B_i) \cdot P_i(A_i, B_i), \quad (5)$$

where $P_i(A_i, B_i) \in [0, 1]$ – the probability of joint occurrence of values A_i and B_i in precedent cases, obtained from empirical data or an expert-defined model.

Approach 3: Bayesian interpretation.

The model may use similarity as evidence in support of a diagnostic hypothesis:

$$P(H_k | \text{observed similarity}) \propto P(\text{сходство} | H_k) \cdot P(H_k), \quad (6)$$

where H_k – the hypothesis of membership in a specific failure class.

In CBR-based diagnostic systems, the efficiency and accuracy of precedent matching rely heavily on the correct measurement of their similarity. However, the classical similarity model – based on the weighted sum of partial distances – overlooks a critical factor: the varying importance of feature matches depending on their probabilistic nature and context.

To improve the interpretability and reliability of results, this study employs a modified similarity metric that incorporates a probabilistic multiplier reflecting the frequency of joint feature occurrences or their statistical relevance. This approach accounts not only for how close the features are in value but also for how typical such a match is among known failure cases.

In Equation (5), the traditional similarity measure is adjusted by the coefficient $P_i(A_i, B_i)$, which acts as a credibility filter. Even when values A_i and B_i are numerically close, the final similarity score is lowered if their match is statistically rare in diagnostic practice. Conversely,

moderate similarity may be weighted more heavily if it frequently appears in similar failure scenarios.

For example, if the “oil temperature” differs by only 2°C between two precedents, but such values occur under different operating conditions, the similarity would be overestimated without probabilistic correction.

The use of the multiplier P_i mitigates this effect. Oil temperature can be measured in various contexts: in the crankcase of a diesel engine – indicating overall thermal state; at the radiator/heat exchanger inlet – reflecting cooling effectiveness and thermal load; after the radiator – critical for assessing the cooling system's condition; in the gearbox – especially relevant for ships using electric propulsion via gearboxes.

Advantages of this approach include: flexibility: it does not alter the logic of the existing model; improved reliability: incorporates real-world probabilities; interpretability: each contribution to the final metric has a statistical justification; ease of integration: can be implemented using an existing case database.

If weight optimization or model training is later applied, the probabilistic multiplier may either be adapted or replaced with a conditional probability derived from Naive Bayes models or decision trees. To evaluate the influence of the probabilistic component on the final similarity score between precedents, a comparative plot (Fig. 2) was constructed, showing the difference between the classical and the probability-weighted similarity metrics.

As shown in Figure 2, the similarity index weighted by probability is often lower, especially for rare failures, because critical features are assigned greater importance. When such features match, however, the resulting similarity score is higher. This leads to a reordering of the ranking and a more accurate risk assessment. The probabilistic approach enhances the model's sensitivity to rare but significant similarities, which is crucial for diagnosing failures in SPP.

The optimization of parameter weights allows the model to reflect their diagnostic relevance. The coefficients $\alpha_{s,i}$, $\beta_{s,i}$ and $\gamma_{s,i}$ are optimized using the Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm with Box constraints (L-BFGS-B) [19, 20], which minimizes the following loss function:

$$J(\alpha_{s,i}, \beta_{s,i}, \gamma_{s,i}) = \sum_i^M (S_{norm}(A, B_i) - y_i)^2,$$

where y_i – binary label (1 if the precedents are considered similar, 0 otherwise) for the training set of M known pairs.

The optimization process included several stages:

- Formation of a training dataset containing precedent pairs with known expert-assigned similarity labels;
- Initialization of the weight coefficients;
- Evaluation of optimization quality on a test dataset.

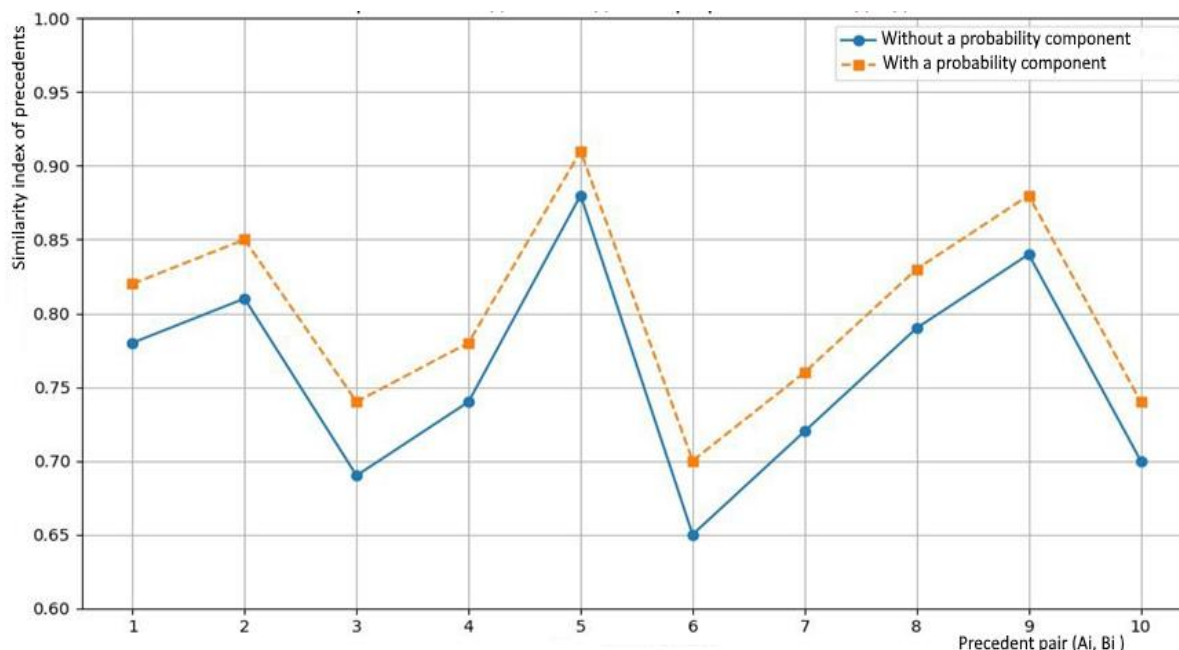


Fig. 2 – Comparison of similarity index between precedents with and without the probabilistic component

The L-BFGS-B method was chosen due to its efficiency under constraint conditions and its good convergence behavior on small datasets. Unlike standard gradient descent, it does not require manual step size selection and inherently respects weight boundaries. The optimization is implemented using `scipy.optimize`, with specified initial weights, a custom error function, and its minimization.

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

# Reference similarity scores (from the training set)
y_true = np.array([...]) # expert evaluations

# Function to compute similarity between precedent
pairs based on weights
def similarity_model(weights, data_pairs):
    similarities = []
    for pair in data_pairs:
        # Combination of different similarity metrics
        (hypothetical example)
        sim = (weights[0] * cosine_similarity(pair[0]['type'], pair[1]['type']) +
              weights[1] * euclidean_similarity(pair[0]['prob'], pair[1]['prob']) +
              weights[2] * jaccard_similarity(pair[0]['risk'], pair[1]['risk']) +
              weights[3] * jaccard_similarity(pair[0]['subsys'], pair[1]['subsys']))
        similarities.append(sim)
    return np.array(similarities)
```

Objective function: MSE between expert labels and model predictions

```
def objective(weights, data_pairs, y_true):
    y_pred = similarity_model(weights, data_pairs)
    return np.mean((y_true - y_pred) ** 2)
```

Initial weights

```
initial_weights = [0.25, 0.25, 0.25, 0.25]
```

Bounds: each weight must be between 0 and 1

```
bounds = [(0, 1)] * 4
```

Optimization

```
result = minimize(objective, initial_weights,
                  args=(data_pairs, y_true), method='L-BFGS-B',
                  bounds=bounds)
optimal_weights = result.x
```

The provided code implements the process of optimizing the weights of parameters used in evaluating the similarity between fault precedents. The optimization is performed using the L-BFGS-B method based on minimizing the mean squared error (MSE) between model predictions and expert assessments of similarity.

Figure 3 illustrates the behavior of the objective function (mean squared error) over the course of the L-BFGS-B optimization iterations.

As shown in Figure 3, the error value rapidly decreases during the initial steps and stabilizes after 10-15 iterations, indicating convergence of the method and the achievement of stable optimal weight values.

To demonstrate the similarity assessment model, two failure precedents (A and B) of SPP equipment are compared across four parameters: failure type, failure probability, risk category, and affected subsystems. Table 2

provides an example of similarity calculation between two precedents, illustrating the application of the model.

The final similarity between precedents A and B is 0.958, indicating a high degree of parametric closeness. The model offers a flexible and interpretable approach to fault similarity assessment, accounting for heterogeneous

data types – numerical, categorical, and set-based features. It utilizes specialized similarity metrics, trainable weights based on labeled datasets, and normalization of the final score. This configuration ensures accurate and adaptive diagnostics, enhancing the reliability of identifying analogous cases under operating conditions of SPPs.

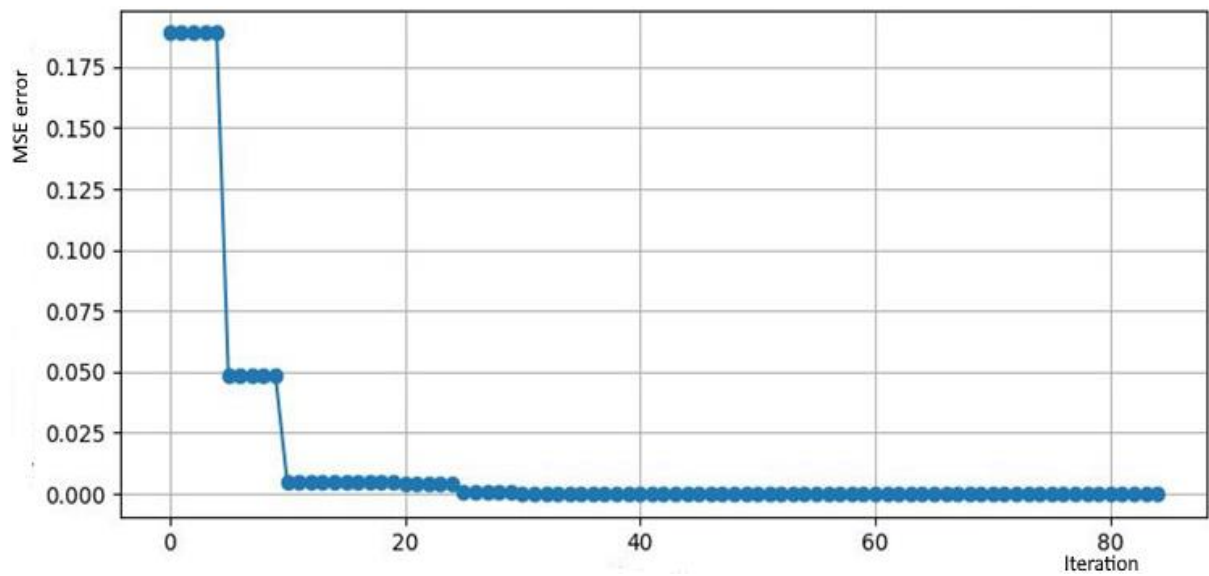


Fig. 3 – Behavior of the objective function (mean squared error) during optimization iterations

Table 2

Example of similarity calculation between two failure precedents

Parameter	Precedent A	Precedent B	Type	Partial Similarity s_i	Weight w_i	Contribution $w_i \cdot s_i$
Equipment Type	Diesel Generator	Diesel Generator	categ.	1.0	0.15	0.15
Operating Time to Failure	1200 h	1000 h	num.	0.83	0.10	0.083
Failure Type	Overheating	Overheating	categ.	1.0	0.20	0.20
Temperature, °C	85	90	num.	0.92	0.15	0.138
Pressure, MPa	2.1	2.0	num.	0.95	0.15	0.143
Vibration, mm/s	4.5	4.8	num.	0.94	0.10	0.094
Operating Conditions	Tropics	Tropics	categ.	1.0	0.15	0.15
Sum						0.958

Conclusions

This paper addresses the development of a unified similarity assessment model for precedents, aimed at application within intelligent decision support systems for diagnosing failures in ship power plant (SPP) equipment. The proposed model accounts for the heterogeneous nature of diagnostic data and implements an adaptive approach to selecting similarity metrics – Euclidean, cosine, and Jaccard – depending on the feature type (numerical, categorical, or set-based). To improve the accuracy of matching, feature weighting is introduced based on diagnostic relevance, implemented using numerical optimization. This ensures the model's flexibility and adaptability to changing operational conditions and equipment configurations.

The formalized structure of a precedent and the proposed classification of typical failures provide a standardized representation of diagnostic information, simplifying the implementation of matching algorithms within the CBR methodology. A review of existing methods revealed their limitations when applied to incomplete, heterogeneous, and poorly structured data, underscoring the relevance of the proposed approach. The matching algorithm, which incorporates operational context, demonstrates interpretability, scalability, and practical applicability in intelligent diagnostic systems. Its deployment improves the reliability and timeliness of failure identification and contributes to the overall reliability, safety, and efficiency of ship power plant operations – particularly under conditions of limited training data and high failure variability.

References

- [1] V. Vychuzhanin, and A. Vychuzhanin, *Stochastic Models and Methods for Diagnostics, Assessment, and Prediction of the Technical Condition of Complex Critical Systems*. Lviv-Torun: Liha-Pres, 2025. doi: **10.36059/978-966-397-457-6**.
- [2] N. Neykov, and S. Stefanova, «Using case-based reasoning in system diagnostics and maintenance», in Proc. of 7-th Int. Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, vol. 464, pp. 305-312. doi: **10.1007/978-981-19-2394-4_28**.
- [3] Z. Chen, K. Wang, C. Zhang, and Q. Wang, «Graph neural network-based fault diagnosis: A review», 2021, *arXiv:2107.04542*. doi: **10.48550/arXiv.2107.04542**.
- [4] H. Lin, Q. Wu, L. Liu, and X. Song, «Case-based reasoning system for aeroengine fault diagnosis enhanced with attitudinal Choquet integral», *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, article 1130, 2022. doi: **10.3390/app12031130**.
- [5] J. Ye, «Single-valued neutrosophic similarity measures based on cotangent function and their application in the fault diagnosis of steam turbine», *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4229-4236, 2017. doi: **10.3233/JIFS-169424**.
- [6] J. Serrà, and J.L. Arcos, «An empirical evaluation of similarity measures for time series classification», *Pattern Recognition Letters*, vol. 35, pp. 45-52, 2014. doi: **10.1016/j.patrec.2012.12.020**.
- [7] I. El Bitar, F.Z. Belouadha, and O. Roudies, «A logic and adaptive approach for efficient diagnosis systems using CBR», *International Journal of Computer Applications*, vol. 39, no. 15, pp. 1-5, 2012. doi: **10.5120/4893-7393**.
- [8] V. Vychuzhanin, N. Shibaeva, A. Vychuzhanin, and N. Rudnichenko, «Intellectualization Method and Model of Complex Technical System's Failures Risk Estimation and Prediction», in Proc. of the 6-th Int. Workshop «Computer Modeling and Intelligent Systems», Zaporizhzhia, Ukraine, 2023, vol. 3392, pp. 130-140. doi: **10.32782/cm15/3392-11**.
- [9] V. Vychuzhanin, and N. Rudnichenko, «Complex Technical System Condition Diagnostics and Prediction Computerization», in Proc. of the 3-d Int. Workshop «Computer Modeling and Intelligent Systems», Zaporizhzhia, Ukraine, 2020, vol. 2608, pp. 1-15. doi: **10.32782/cm15/2608-4**.
- [10] H. Wang, and W. Wang, «Bearing fault diagnosis method based on similarity measure and ensemble learning», *Measurement Science and Technology*, vol. 32, no. 5, 2021. doi: **10.1088/1361-6501/abda97**.
- [11] J. Choi, D. Kong, and H. Cho, «Weighted domain adaptation using the graph-structured dataset representation for machinery fault diagnosis under varying operating conditions», *Sensors*, vol. 24, no. 1, article 188, 2024. doi: **10.3390/s24010188**.
- [12] Z. Cheng, and A. Yan, «A case weighted similarity deep measurement method based on a self-attention Siamese neural network», *Industrial Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 1, 2023. doi: **10.1007/s44244-022-00002-y**.
- [13] X. Diao, M. Pietrykowski, F. Huang, C. Mutha, and C. Smidts, «An ontology-based fault generation and fault propagation analysis approach for safety-critical computer systems at the design stage», *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 36, no. 3, pp. 345-360, 2022. doi: **10.1017/S0890060421000342**.
- [14] A. Aamodt, and E. Plaza, «Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches», *AI Communications*, vol. 7, no. 1, pp. 39-59, 1994. doi: **10.3233/AIC-1994-7104**.
- [15] C.D. Manning, P. Raghavan, and H. Schütze, *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. doi: **10.1017/CBO9780511809071**.
- [16] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2nd ed. New York: Springer, 2009. doi: **10.1007/978-0-387-84858-7**.
- [17] C.M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006.

- [18] P.-N. Tan, M. Steinbach, and V. Kumar, *Introduction to Data Mining*, 1st ed. Boston: Addison-Wesley, 2005.
- [19] P.T. Boggs, and R.H. Byrd, «Adaptive, Limited-Memory BFGS Algorithms for Unconstrained Optimization», *SIAM Journal on Optimization*, vol. 29, no. 2, pp. 947-967, 2019. doi: 10.1137/16M1065100.
- [20] H. Tankaria, S. Sugimoto, and N. Yamashita, «A Regularized Limited Memory BFGS Method for Large-Scale Unconstrained Optimization and its Efficient Implementations», 2021, *arXiv:2101.04413*. doi: 10.48550/arXiv.2101.04413.

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОДІБНОСТІ МІЖ ПРЕЦЕДЕНТАМИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ВІДМОВ ОБЛАДНАННЯ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

- Вичужанін В.** д-р техн. наук, професор, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6302-1832>, e-mail: v.v.vychuzhanin@op.edu.ua;
- Вичужанін А.** доктор філософії (Комп'ютерні науки), доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8779-2503>, e-mail: vychuzhanin.o.v@op.edu.ua

Сучасні суднові енергетичні установки (СЕУ) є високотехнологічними комплексами, функціонування яких супроводжується постійним збором та аналізом великих обсягів діагностичних даних. Підвищення ефективності технічної експлуатації таких систем потребує розробки інтелектуальних засобів діагностики, здатних до точного розпізнавання й інтерпретації типових відмов. У статті розглянуто задачу оцінювання ступеня подібності між прецедентами в рамках методології Case-Based Reasoning (CBR), що є актуальним підходом за умов обмеженої навчальної вибірки та високої варіативності відмов. Подано аналітичний огляд сучасних методів оцінювання подібності, зокрема метричних підходів, агрегуючих операторів (зокрема інтеграла Чокета), логіко-вивідних систем та семантичних графових моделей. Визначено основні обмеження цих підходів: низька адаптивність до гетерогенних даних, слабка інтерпретованість результатів і висока залежність від апріорної інформації. Авторами запропоновано уніфіковану модель визначення подібності, яка враховує різноманітність діагностичних ознак. У моделі реалізовано інтеграцію різних метрик (евклідової, косинусної та Жаккара) залежно від типу даних (числові, категоризовані, множинні). Діагностична значущість ознак задається ваговими коефіцієнтами, які визначаються чисельною оптимізацією. У роботі також подано формалізований опис структури прецедента, класифікацію типових відмов та алгоритм зіставлення з урахуванням контексту експлуатації. Запропонований підхід забезпечує інтерпретованість, адаптивність і масштабованість моделі, що підтверджує її застосовність в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень для діагностики відмов обладнання СЕУ. Практична реалізація моделі сприятиме підвищенню надійності, безпеки й ефективності експлуатації морських технічних систем.

Ключові слова: інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, суднова енергетична установка, відмова обладнання, прецедент, Case-Based Reasoning, подібність прецедентів, метрика, інтерпретованість.

Перелік використаних джерел

- [1] Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Stochastic Models and Methods for Diagnostics, Assessment, and Prediction of the Technical Condition of Complex Critical Systems. Lviv-Torun: Liha-Pres, 2025. 176 p. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-457-6>.
- [2] Neykov N., Stefanova S. Using case-based reasoning in system diagnostics and maintenance. *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 464. Pp. 305-312. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2394-4_28.
- [3] Graph neural network-based fault diagnosis: A review / Chen Z., Wang K., Zhang C., Wang Q. arXiv preprint. 2021. arXiv:2107.04542. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04542>.
- [4] Case-based reasoning system for aeroengine fault diagnosis enhanced with attitudinal Choquet integral / Lin H., Wu Q., Liu L., Song X. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 3. Article 1130. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031130>.
- [5] Ye J. Single-valued neutrosophic similarity measures based on cotangent function and their application in the fault diagnosis of steam turbine. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2017. Vol. 32, no. 6. Pp. 4229-4236. DOI: <https://doi.org/10.3233/JIFS-169424>.
- [6] Serrà J., Arcos J.L. An empirical evaluation of similarity measures for time series classification. *Pattern Recognition Letters*. 2014. Vol. 35. Pp. 45-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.12.020>.
- [7] El Bitar I., Belouadha F.Z., Roudies O. A logic and adaptive approach for efficient diagnosis systems using CBR. *International Journal of Computer*

- Applications*. 2012. Vol. 39, no. 15. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.5120/4893-7393>.
- [8] Intellectualization Method and Model of Complex Technical System's Failures Risk Estimation and Prediction / Vychuzhanin V., Shibaeva N., Vychuzhanin A., Rudnichenko N. *Computer Modeling and Intelligent Systems* : Proceedings of The Sixth International Workshop, Zaporizhzhia, Ukraine, 3 May 2023. Vol. 3392. Pp. 130-140. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmris/3392-11>.
- [9] Vychuzhanin V., Rudnichenko N. Complex Technical System Condition Diagnostics and Prediction Computerization. *Computer Modeling and Intelligent Systems* : Proceedings of The Third International Workshop, Zaporizhzhia, Ukraine, 27 April -1 May 2020. Vol. 2608. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmris/2608-4>.
- [10] Wang H., Wang W. Bearing fault diagnosis method based on similarity measure and ensemble learning. *Measurement Science and Technology*. 2021. Vol. 32, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abda97>.
- [11] Choi J., Kong D., Cho H. Weighted domain adaptation using the graph-structured dataset representation for machinery fault diagnosis under varying operating conditions. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 1. Article 188. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24010188>.
- [12] Cheng Z., Yan A. A case weighted similarity deep measurement method based on a self-attention Siamese neural network. *Industrial Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 1, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44244-022-00002-y>.
- [13] An ontology-based fault generation and fault propagation analysis approach for safety-critical computer systems at the design stage / X. Diao et al. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2022. Vol. 36, no. 3. Pp. 345-360. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890060421000342>.
- [14] Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *AI Communications*. 1994. Vol. 7, no. 1. Pp. 39-59. DOI: <https://doi.org/10.3233/AIC-1994-7104>.
- [15] Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 506 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809071>.
- [16] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York: Springer, 2009. 745 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.
- [17] Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. 778 p.
- [18] Tan P.-N., Steinbach M., Kumar V. Introduction to Data Mining. 1st ed. Boston: Addison-Wesley, 2005. 780 p.
- [19] Boggs P.T., Byrd R.H. Adaptive, Limited-Memory BFGS Algorithms for Unconstrained Optimization. *SIAM Journal on Optimization*. 2019. Vol. 29, no. 2. Pp. 947-967. DOI: <https://doi.org/10.1137/16M1065100>.
- [20] Tankaria H., Sugimoto S., Yamashita N. A Regularized Limited Memory BFGS Method for Large-Scale Unconstrained Optimization and its Efficient Implementations. arXiv preprint. 2021. arXiv:2101.04413. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.04413>.
- Стаття надійшла 23.04.2025
Стаття прийнята 15.05.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Model for determining similarity between cases in failure diagnosis of ship power plant equipment. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 9-17. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336233>.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТРАФІКУ МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Клюшник В.В.	канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4197-7171 , e-mail: baksik_evgen@ukr.net ;
Чернецький Є.В.	аспірант, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, e-mail: aico@i.ua ;
Онищенко О.В.	викладач, Дніпропетровський фаховий коледж будівельно-монтажних технологій та архітектури, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459 , e-mail: aleksejonischenko@gmail.com

У статті розглянуто сучасні підходи до ідентифікації та класифікації мережевого трафіку в реальному часі. Дослідження підкреслює актуальність проблеми, пов'язаної з високою динамікою мережевого середовища, та необхідність точних методів для управління, захисту даних і виявлення аномалій. Представлено огляд існуючих моделей трафіку, включаючи моделі на основі розподілів, часових рядів, фрактальних моделей та ланцюгів Маркова. Проведено аналіз методів класифікації, таких як використання номерів портів, DPI (Deep Packet Inspection), машинне навчання та статистичний аналіз пакетів. Критичний аналіз виявив переваги та обмеження кожної моделі. Простота реалізації та ефективність моделей розподілу обмежуються врахуванням залежності між даними. Моделі часових рядів придатні для прогнозування, але потребують значних обчислювальних ресурсів. Фрактальні моделі забезпечують аналіз довготривалих залежностей, проте їх застосування у реальному часі є складним. Ланцюги Маркова демонструють високу точність, але вимагають точної ініціалізації параметрів. Особливу увагу приділено інтеграції методів машинного навчання та оптимізації обчислювальних процесів для роботи із зашифрованим трафіком і в умовах обмежених ресурсів. Автори наголошують на необхідності розробки гібридних рішень, що поєднують переваги різних підходів, та визначають перспективи для подальших досліджень, спрямованих на створення більш точних і продуктивних систем аналізу трафіку. Ключові напрями подальших досліджень включають автоматизацію параметризації моделей, врахування зашифрованого трафіку та розробку алгоритмів машинного навчання, оптимізованих для роботи в реальному часі. Стаття є вагомим внеском у розвиток методів ідентифікації мережевого трафіку, пропонує шляхи підвищення безпеки та якості обслуговування мереж.

Ключові слова: трафік, модель, інформаційні системи, мережа передачі даних.

Постановка проблеми

Мережевий трафік є основою функціонування сучасних інформаційних систем і мереж передачі даних. Його класифікація та ідентифікація мають важливе значення для вирішення завдань управління, захисту даних та виявлення аномалій. Висока динаміка і складність мережевого середовища ставлять перед дослідниками завдання адаптації методів ідентифікації для отримання точних і надійних результатів. Виконаний аналіз дозволить не лише виявити слабкі сторони існуючих рішень, але й сформулювати напрями для подальших досліджень, включаючи вдосконалення існуючих методів і розробку нових підходів до ідентифікації мережевого трафіку. Це відкриває перспективи для створення більш точних і продуктивних рішень, здатних забезпечувати безперервне функціонування інформаційних систем. Ця стаття спрямована на аналіз існуючих моделей і методів ідентифікації мережевого трафіку. У ній проводиться порівняння підходів на основі моделей розподілу, часових рядів, фрактальних моделей і ланцюгів Маркова. Особлива увага приділена аналізу існуючих методів класифікації трафіку, зокрема класифікації за номером порту, детекції пакетів за корисним навантаженням (DPI), використанню методів машинного навчання та статистичних властивостей пакетів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Ідентифікація мережевого трафіку в реальному часі – це процес визначення типу даних, що передаються через мережу, у той самий момент, коли вони передаються [1]. Це ключовий елемент для багатьох мережевих технологій, таких як:

- системи виявлення вторгнень (IDS) – виявляють підозрілу або злочинну активність в мережі;
- системи запобігання вторгненням (IPS) – блокують шкідливий трафік;
- мережеві аналізатори – допомагають усунути проблеми з мережею та оптимізувати її роботу;
- системи управління мережею – автоматизують управління мережевими ресурсами.

Існує багато різних методів ідентифікації мережевого трафіку, але найпоширенішими є:

- Аналіз заголовків пакетів;
- Глибока інспекція пакетів (DPI);
- Машинне навчання.

Аналіз заголовків пакетів – це один з найдавніших і найпоширеніших методів ідентифікації мережевого трафіку. Він полягає у вивченні інформації, що міститься в заголовках даних пакетів, які передаються по мережі. Цей метод дозволяє визначити тип протоколу, джерело і призначення пакету, а також інші важливі характеристики [2].

Принцип роботи аналізу заголовків:

- Захоплення пакетів. Спеціальні програми (сніфери) захоплюють мережевий трафік і зберігають його у файли для подальшого аналізу;
- Розбір заголовків. Програма аналізу розбирає заголовки кожного захопленого пакету, витягуючи з них необхідну інформацію;
- Ідентифікація протоколів. На основі значень полів у заголовку визначається протокол, який використовується для передачі даних;
- Фільтрація. Захоплені пакети фільтруються за різними критеріями, наприклад, за типом протоколу, адресою джерела або призначення;
- Виявлення аномалій. Порівнюючи характеристики пакетів з відомими шаблонами, можна виявити аномалії, які можуть свідчити про наявність загроз.

Переваги методу: простота (аналіз заголовків є відносно простим методом, який не вимагає великих обчислювальних ресурсів); швидкість (аналіз заголовків може виконуватися в реальному часі, що дозволяє швидко виявляти зміни в мережі); ефективність (метод дозволяє ідентифікувати широкий спектр протоколів і служб).

З урахуванням переваг цей метод має свої обмеження. Зашифровані пакети ускладнюють аналіз, оскільки вміст даних недоступний для прямого перегляду. З'являються нові протоколи, які можуть використовувати нестандартні заголовки, що ускладнює їх ідентифікацію. Зловмисники можуть використовувати різні методи для обходу аналізу заголовків [3].

Аналіз заголовків пакетів широко використовується в системах виявлення вторгнень (IDS) і системах запобігання вторгненням (IPS). Ці системи можуть виявляти такі загрози, як сканування портів, DDoS-атаки, вторгнення.

Глибока інспекція пакетів (DPI) – це потужна технологія, яка дозволяє аналізувати вміст мережевих пакетів на більш глибокому рівні, ніж традиційний аналіз заголовків. Вона використовується для виявлення та класифікації різноманітних типів трафіку, включаючи веб-трафік, електронну пошту, VoIP, відео та ін. DPI відіграє ключову роль у забезпеченні мережевої безпеки, управлінні мережею та оптимізації продуктивності [4].

DPI передбачає декодування та аналіз всього вмісту пакету даних, включаючи заголовки і дані. Це дозволяє виявити не тільки тип протоколу, але й конкретні програми, які генерують цей трафік, типи файлів, що передаються, і навіть вміст повідомлень.

Основні етапи DPI:

1. Захоплення пакетів. Спеціальне обладнання або програмне забезпечення захоплює мережевий трафік і передає його на аналіз;
2. Декодування. Пакет розбирається на окремі компоненти, такі як заголовок, дані та контрольні суми;

3. Аналіз вмісту. Вміст пакету аналізується за допомогою різних методів, включаючи пошук патернів, розпізнавання сигнатур, аналіз протоколів і машинне навчання;

4. Класифікація. На основі аналізу пакет класифікується за типом, додатком або користувачем;

5. Прийняття рішення. На основі результатів класифікації приймається рішення про подальшу обробку пакету (наприклад, блокування, дозволу, зміну пріоритету).

DPI має широкий спектр застосування – безпека (виявлення і блокування шкідливого трафіку (віруси, шпигунське програмне забезпечення, ботнети)); фільтрація веб-контенту (захист від DDoS-атак); управління мережею (контроль доступу до мережевих ресурсів); оптимізація використання пропускну здатності; аналіз використання мережі; квалітет обслуговування (QoS) (пріоритезація певних типів трафіку (наприклад, VoIP, відеоконференції), гарантування якості передачі даних для критично важливих додатків) [5].

До переваг можна DPI віднести:

- висока точність класифікації трафіку;
- можливість виявлення нових загроз;
- гнучкість налаштування;
- детальна статистика про використання мережі.

Недоліки DPI впливають із його переваг:

- висока обчислювальна складність;
- ризик порушення конфіденційності;
- можливість помилкових спрацювань.

Машинне навчання – це галузь штучного інтелекту, яка дозволяє комп'ютерам навчатися на даних і робити прогнози або приймати рішення без явного програмування. У контексті мережевої безпеки машинне навчання використовується для ідентифікації мережевого трафіку з високою точністю і швидкістю [6].

Алгоритм роботи машинного навчання для ідентифікації трафіку.

На першому етапі іде збір даних. Збирається велика кількість даних про мережевий трафік. Ці дані включають в себе заголовки пакетів, вміст пакетів (якщо доступний), статистику про трафік і іншу релевантну інформацію. Чим більше інформації, тим вища якість машинного навчання. Далі іде обробка даних. Дані очищаються, нормалізуються і перетворюються в формат, придатний для навчання моделей машинного навчання. Після цього вже іде безпосередньо навчання моделі. Вибирається відповідний алгоритм машинного навчання (наприклад, нейронні мережі, випадкові ліси, SVM) і навчається на підготовлених даних. Модель навчається виявляти закономірності і відмінності між різними типами трафіку [7].

Після навчання, обов'язково проводиться тестування моделі та деплоймент. Навчена модель тестується на нових даних, щоб оцінити її точність, а вже потім модель розгортається в реальній системі для

ідентифікації мережевого трафіку в режимі реального часу.

Машинне навчання для ідентифікації трафіку використовуються для:

- виявлення аномалій. Виявлення незвичайної поведінки в мережі, що може свідчити про атаку або збій;
- класифікація трафіку. Визначення типу трафіку (веб, пошта, P2P, VoIP тощо);
- виявлення ботнетів. Виявлення мережі заражених комп'ютерів, які використовуються для здійснення DDoS-атак або розповсюдження спаму;
- виявлення інфікованих хостів. Виявлення комп'ютерів, заражених вірусами або іншим шкідливим програмним забезпеченням.

Найбільш розповсюдженими типами алгоритмів машинного навчання є: нейронні мережі, випадкові ліси, SVM (Support Vector Machines).

Серед існуючих інструментів для ідентифікації трафіку можна визначити наступні:

- Wireshark: Популярний інструмент з відкритим кодом для аналізу мережевого трафіку.
- Tcpdump: Командна утиліта для захоплення та аналізу пакетів.
- Snort: Система виявлення вторгнень з відкритим кодом.
- Bro: Інструмент для аналізу мережевого трафіку, що використовує мову програмування для написання правил аналізу.
- Комерційні рішення: Існують різноманітні комерційні рішення від таких компаній, як Cisco, Fortinet, Palo Alto Networks.

Ідентифікація мережевого трафіку в реальному часі є важливою задачею для забезпечення безпеки мереж і оптимізації їх роботи. З розвитком технологій і

зростанням кількості загроз, ця область продовжує активно розвиватися [8].

Мета статті

Метою статті є узагальнення та критичний аналіз сучасних підходів до ідентифікації та класифікації мережевого трафіку з метою розробки ефективних гібридних рішень, здатних працювати з зашифрованими даними в режимі реального часу та підвищувати безпеку й якість обслуговування мереж.

Виклад основного матеріалу

Існуючі моделі мережевого трафіку можна класифікувати наступним чином:

Моделі на основі законів розподілу:

- Приклад: Пуассонівська модель (простота реалізації, але відсутність пам'яті).
- Переваги: простота використання.
- Обмеження: не враховують залежність між пакетами.

На рисунку 1 представлено порівняння рівня складності різних моделей мережевого трафіку, включаючи моделі на основі законів розподілу, часових рядів, фрактальні моделі і моделі на основі ланцюгів Маркова. Це допомагає оцінити їх придатність для задач реального часу.

Моделі часових рядів:

- Приклад: AR, ARMA, ARIMA (прогнозування трафіку з урахуванням сезонних характеристик).
- Переваги: врахування короткострокових залежностей.
- Обмеження: висока обчислювальна складність.

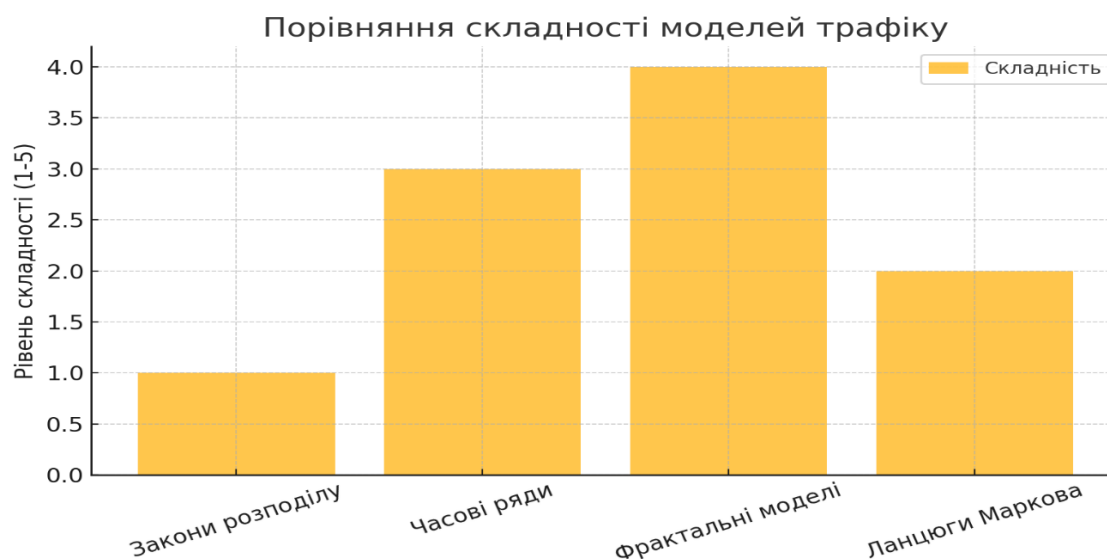


Рис.1 – Порівняння рівня складності різних моделей мережевого трафіку

На рисунку 2 показано порівняльну точність розглянутих моделей. Видно, що моделі на основі ланцюгів Маркова забезпечують найвищий рівень точності порівняно з іншими підходами.

Фрактальні моделі:

- Приклад: фрактальний броунівський рух (довготривала залежність).
- Переваги: опис явища пульсації трафіку.
- Обмеження: складність застосування у реальному часі.

Моделі на основі ланцюгів Маркова:

- Приклад: приховані Марковські моделі (врахування станів системи).
- Переваги: середня обчислювальна складність.

- Обмеження: необхідність точної ініціалізації параметрів.

Методи класифікації мережевого трафіку включають:

Класифікація за номером порту:

- Переваги: висока швидкість.
- Обмеження: непридатність для сучасних зашифрованих застосунків.

На рисунку 3 представлено аналіз складності різних методів класифікації мережевого трафіку. DPI і машинне навчання потребують більше обчислювальних ресурсів, тоді як класифікація за номером порту залишається найменш складною.

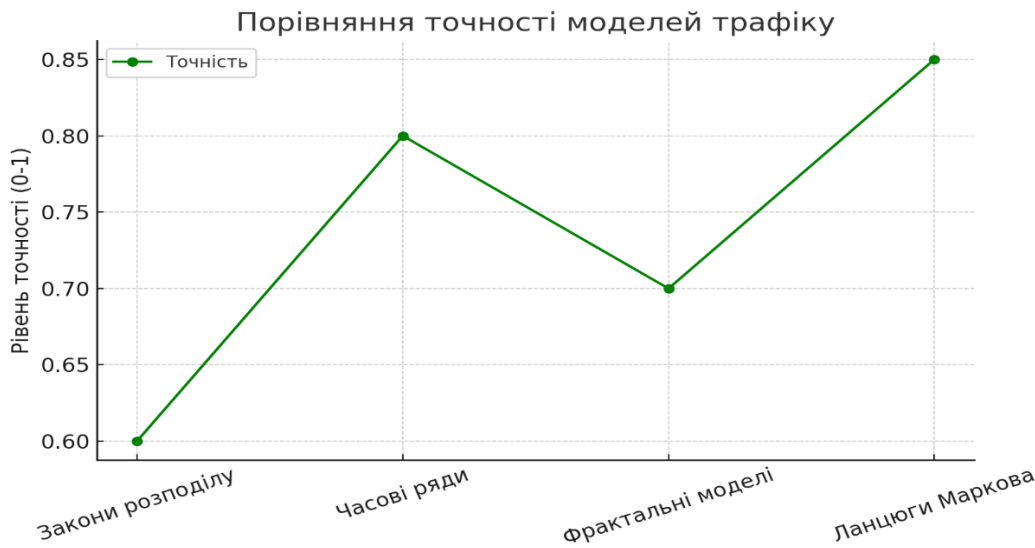


Рис. 2 – Порівняльна точність розглянутих моделей

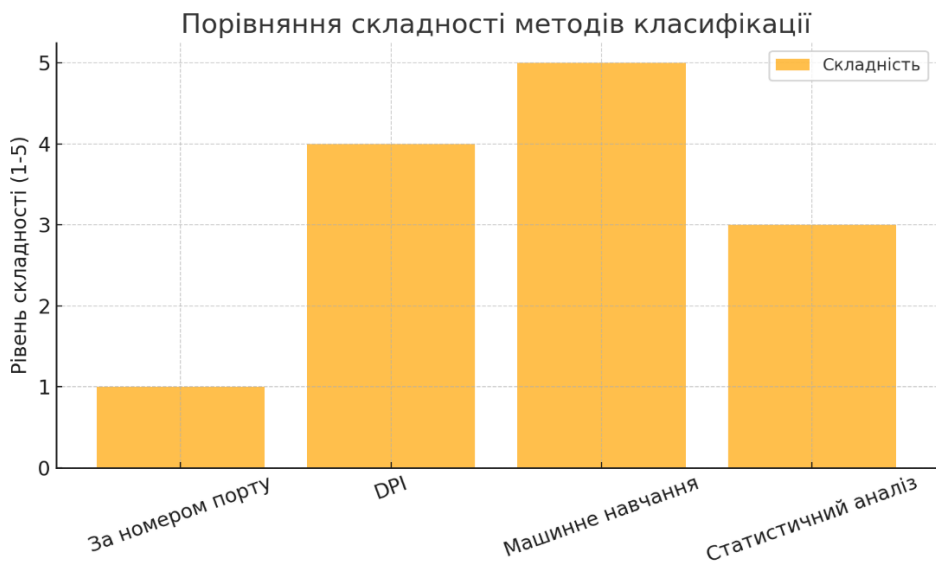


Рис. 3 – Аналіз складності різних методів класифікації мережевого трафіку

Глибокий аналіз вмісту пакетів (DPI):

- Переваги: висока точність для відомих застосунків.

- Обмеження: неможливість роботи із зашифрованим трафіком.

На рисунку 4 показано точність методів класифікації. DPI забезпечує максимальну точність, проте має обмеження в умовах роботи із зашифрованим трафіком.

Методи машинного навчання:

- Приклади: SVM, дерева рішень.

- Переваги: адаптація до різних типів трафіку.

- Обмеження: висока обчислювальна складність.

Статистичний аналіз пакетів:

- Переваги: незалежність від корисного навантаження.

- Обмеження: значні обчислювальні ресурси.

Проведений аналіз існуючих моделей і методів класифікації мережевого трафіку дозволив виявити їх ключові переваги та недоліки:

- Моделі на основі законів розподілу мають простоту реалізації, проте не враховують історичну залежність між пакетами. Це обмежує їх застосування для задач реального часу, де важливо враховувати контекст попередніх даних.

- Моделі часових рядів ефективно використовують короткострокові залежності, що робить їх придатними для прогнозування і аналізу певних типів трафіку. Проте їх висока обчислювальна складність

обмежує використання в умовах високої пропускну здатності.

- Фрактальні моделі забезпечують довготривалі залежності, дозволяючи оцінювати мережеві ресурси і виявляти аномалії. Проте вони не підходять для ідентифікації трафіку в реальному часі через необхідність обробки великої кількості даних.

- Ланцюги Маркова, особливо приховані Марковські моделі, успішно застосовуються для класифікації різних протоколів і типів трафіку. Проте їх ефективність залежить від правильної ініціалізації параметрів, що вимагає додаткових обчислювальних зусиль.

- Методи машинного навчання мають високу точність і адаптивність, проте часто вимагають великого обсягу даних для навчання і значних ресурсів для обробки, що робить їх менш придатними в умовах реального часу.

- Статистичний аналіз пакетів демонструє гарні результати для класифікації трафіку, проте його використання обмежене складністю розрахунків, особливо при роботі із зашифрованими даними.

Висновки, зроблені на основі критичного аналізу, підкреслюють необхідність розробки нових методів, які зможуть поєднати переваги існуючих підходів, мінімізувавши їх недоліки. Це включає створення гібридних рішень, таких як комбінація статистичного аналізу і прихованих Марковських моделей, що дозволить досягти більш високої точності при зниженні обчислювальної складності.

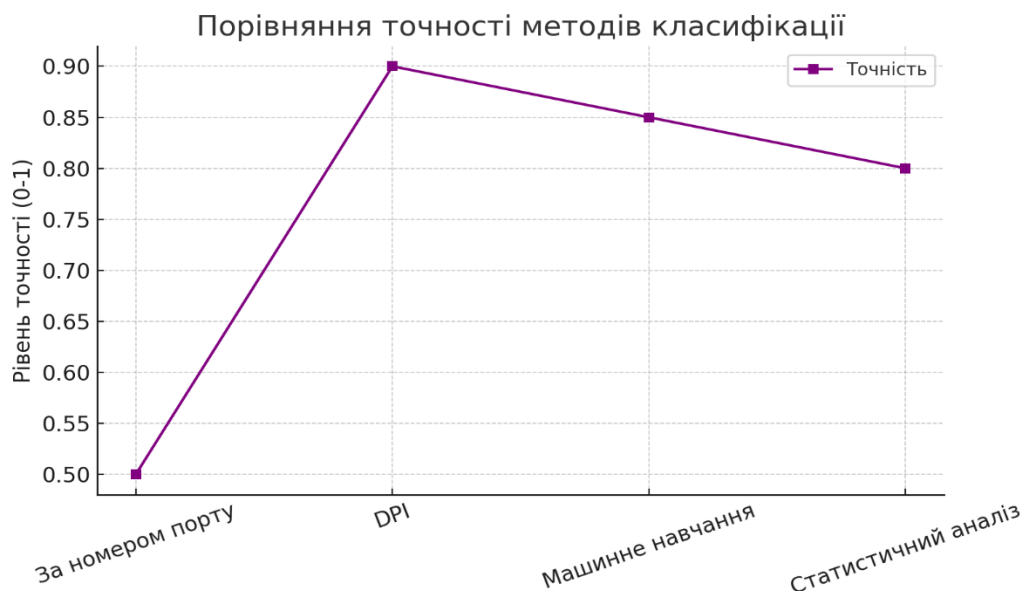


Рис. 4 – Точність методів класифікації

Висновки

Проведений аналіз існуючих моделей і методів класифікації мережевого трафіку показав, що кожна з них має свої переваги і обмеження. Простота використання класичних моделей, висока точність машинного навчання і адаптивність статистичних підходів створюють основу для розробки нових гібридних рішень. Необхідність у створенні методів, які враховують шифрування даних і забезпечують високу продуктивність у реальному часі, стає дедалі актуальнішою. Виділені напрями для подальших досліджень можуть закласти основу для нових рішень, здатних справлятися з сучасними викликами у сфері аналізу мережевого трафіку. Таким чином, створення гібридних підходів і оптимізація існуючих методів є ключовими кроками на шляху до більш ефективної ідентифікації мережевого трафіку, що, своєю чергою, сприяє поліпшенню якості обслуговування і безпеки мережевих систем.

Перелік використаних джерел

- [1] Park J.W., Kwon M.W., Hong T. Queue congestion prediction for large-scale high performance computing systems using a hidden Markov model. *The Journal of Supercomputing*. 2022. Vol. 78. Pp. 12202-12223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-022-04356-z>.
- [2] Network Traffic Classification Using Correlation Information. *Parallel and Distributed Systems* / J. Zhang et al. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2013. Vol. 24, iss. 1. Pp. 104-117. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.98>.
- [3] Технології забезпечення безпеки мережевої інфраструктури: Підручник / В.Л. Бурячок та ін. К. : КУБГ, 2019. 218 с.
- [4] Abbasi M., Shahraki A., Taherkordi A. Deep Learning for Network Traffic Monitoring and Analysis (NTMA): A Survey. *Computer Communications*. 2021. Vol. 170. Pp. 19-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.01.021>.
- [5] So-In C. A survey of network traffic monitoring and analysis tools. Washington University in St. Louis, 2009. 24 p.
- [6] Big-DAMA: Big Data Analytics for Network Traffic Monitoring and Analysis / Casas P., D'Alconzo A., Zseby T., Mellia M. Proceedings of the 2016 Workshop on Fostering Latin-American Research in Data Communication Networks (LANCOMM '16), Florianopolis, Brazil, 22-26 August 2016. Pp. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1145/2940116.2940117>.
- [7] Passive Flow Monitoring of Hybrid Network Connections regarding Quality of Service Parameters for the Industrial Automation / M. Ehrlich et al. *Kommunikation in der Automation*, Magdeburg, Germany, 2017. Pp. 1-11.
- [8] The Data Domain Construction of Digital Twin Network / D. Chen et al. 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), Orlando, FL, USA, 07-09 November 2023. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/DTPI59677.2023.10365474>.

IDENTIFY DATA NETWORK TRAFFIC IN REAL TIME

Klyushnyk V.V.	PhD (Engineering), associate professor, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4197-7171 , e-mail: baksik_evgen@ukr.net ;
Chernetskyi E.V.	postgraduate student, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, e-mail: aico@i.ua ;
Onishchenko O.V.	lecturer, Dnipro Applied College of Building and Mounting Technologies and Architecture, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459 , e-mail: aleksevonischenko@gmail.com

The article discusses modern approaches to real-time identification and classification of network traffic. The research emphasizes the urgency of the problem associated with the high dynamics of the network environment and the need for accurate methods for managing, protecting data, and detecting anomalies. An overview of existing traffic models is presented, including models based on distributions, time series, fractal models, and Markov chains. Classification methods such as port numbers, DPI (Deep Packet Inspection), machine learning, and statistical packet analysis are analyzed. The critical analysis revealed the advantages and limitations of each model. The ease of implementation and effectiveness of distribution models are limited by the consideration of dependencies between data. Time series models are suitable for forecasting but require significant computing resources. Fractal models provide an analysis of long-term dependencies, but their application in real time is difficult. Markov chains demonstrate high accuracy but require accurate initialization of parameters. Particular attention is paid to the integration of machine learning and computing process optimization methods for working with encrypted traffic and in conditions of limited resources. The authors emphasize the need to develop hybrid solutions that combine the advantages of different approaches and identify prospects for further research

aimed at creating more accurate and efficient traffic analysis systems. Key areas for further research include automating model parameterization, taking into account encrypted traffic, and developing machine learning algorithms optimized for real-time operation. This article is a significant contribution to the development of network traffic identification methods, suggesting ways to improve the security and quality of service of networks.

Keywords: traffic, model, information systems, data transmission network.

References

- [1] J.W. Park, M.W. Kwon, and T. Hong, «Queue congestion prediction for large-scale high performance computing systems using a hidden Markov model», *The Journal of Supercomputing*, vol. 78, pp. 12202-12223, 2022. doi: 10.1007/s11227-022-04356-z.
- [2] J. Zhang, Y. Xiang, Y. Wang, W. Zhou, Y. Xiang, and Y. Guan, «Network Traffic Classification Using Correlation Information. Parallel and Distributed Systems», *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, iss. 1, pp. 104-117, 2013. doi: 10.1109/TPDS.2012.98.
- [3] V.L. Buryachok, *Tekhnologii zabezpechennia bezpeky merezhevoi infrastruktury: Pidruchnyk* [Network Infrastructure Security Technologies: Textbook]. Kyiv, Ukraine: KUBG Publ., 2019. (Ukr.)
- [4] M. Abbasi, A. Shahraki, and A. Taherkordi, «Deep Learning for Network Traffic Monitoring and Analysis (NTMA): A Survey», *Computer Communications*, vol. 170, pp. 19-41, 2021. doi: 10.1016/j.comcom.2021.01.021.
- [5] C. So-In, *A survey of network traffic monitoring and analysis tools*. Washington University in St. Louis, 2009.
- [6] P. Casas, A. D'Alconzo, T. Zseby, and M. Mellia, «Big-DAMA: Big Data Analytics for Network Traffic Monitoring and Analysis», in Proc. of the 2016 Workshop on Fostering Latin-American Research in Data Communication Networks (LANCOMM '16), Florianopolis, Brazil, 2016, pp. 1-3. doi: 10.1145/2940116.2940117.
- [7] M. Ehrlich, A. Biendarra, H. Trsek, E. Wojtkowiak, and J. Jasperneite, «Passive Flow Monitoring of Hybrid Network Connections regarding Quality of Service Parameters for the Industrial Automation», in Proc. of the Kommunikation in der Automation, Magdeburg, Germany, 2017, pp. 1-11.
- [8] D. Chen, C. Zhou, H. Yang, M. Li, and L. Lu, «The Data Domain Construction of Digital Twin Network», in Proc. of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1-5. doi: 10.1109/DTPI59677.2023.10365474.

Стаття надійшла 07.02.2025

Стаття прийнята 21.02.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Ключник В.В., Чернецький Є.В., Онищенко О.В. Ідентифікація трафіку мереж передачі даних у реальному часі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 50. С. 18-24. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336234>.

УДК 004.93

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336246

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ БАГАТОРІВНЕВОГО АДАПТИВНОГО ТЕСТУВАННЯ У ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Федосова І.В.	д-р пед. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3923-8270 , e-mail: fedosova_i_v@pstu.edu ;
Проніна О.І.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7085-8027 , e-mail: pronina_o_i@pstu.edu ;
Веремій В.О.	магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

Стаття присвячена розгляданню підходу до підвищення якості освітнього процесу шляхом впровадження комп'ютерного адаптивного тестування. В роботі акцентується увага на проблемах традиційного оцінювання знань, таких як відсутність індивідуалізації та суб'єктивність викладача, й пропонують адаптивні методи формування тестів, які враховують рівень підготовки здобувача освіти в режимі реального часу. Описано різні алгоритми адаптивного тестування. Також описано метод багаторівневого тестування з блоковою структурою, де завдання змінюються відповідно до попередніх відповідей. Цей метод був покладений в основу інформаційної системи для перевірки якості знань здобувачів. Було наведено формулу для розрахунку переходу між блоками, що окреслюють рівень знань в тесті. Також було описано інтерфейс користувача, типи питань, подано реалізацію системи тестування, а також механізм зміни рівнів складності в процесі проходження тесту. Інтерфейс системи є зручним для користувача і передбачає підтримку різних типів тестових завдань, що робить її універсальною для використання в закладах освіти. Розроблена багаторівнева структура тесту дозволяє гнучко адаптувати не лише складність, а й логіку переходу між завданнями, підвищуючи точність і об'єктивність оцінювання, а також зменшуючи загальну тривалість тестування. Реалізована методика демонструє практичну доцільність і гнучкість впровадження адаптивного підходу в систему автоматизованого контролю знань, що може стати основою для створення більш ефективних освітніх технологій.

Ключові слова: адаптивне тестування, інтелектуальна система, індивідуальна траєкторія тесту, оцінка знань.

Постановка проблеми

У сучасній системі освіти пріоритет набуває не лише доступність, а й якість навчання. Питання якості набуває особливої ваги як у педагогічній науці, так і в суспільному дискурсі [1]. Одним із способів визначення ефективності освітнього процесу є аналіз того, наскільки добре здобувачі освіти опановують навчальний матеріал. Рівень знань здобувачів оцінюється шляхом спеціально організованих перевірок, які мають педагогічну основу. Зазвичай ці перевірки передбачають аналіз відповідей на завдання різного рівня складності. Щоб мінімізувати вплив особистих оцінок викладача, все частіше використовуються автоматизовані засоби перевірки знань, зокрема тестові системи, які дозволяють забезпечити більш об'єктивне оцінювання.

Адаптивне тестування з'явилося як відповідь на потребу зробити процес оцінювання знань більш ефективним. Основна ідея полягала в тому, щоб скоротити кількість завдань і час, витрачений на тестування, водночас підвищивши точність визначення рівня підготовки здобувачів освіти. Ключовим принципом цієї технології є індивідуальний підхід до формування тесту – завдання підбираються відповідно до знань конкретного учасника, що дозволяє формувати більш результативну систему перевірки.

Головною рисою комп'ютерного адаптивного тестування є побудова індивідуальної послідовності завдань безпосередньо під час проходження тесту. Ця

послідовність залежить від рівня підготовки кожного учасника, який оцінюється в режимі реального часу – іноді навіть із можливістю прогнозування подальших відповідей. У результаті можна говорити про те, що:

- кожен конкретний тест унікальний і не був раніше опублікований, що також підвищує його секретність (і надійність);

- ефективність комп'ютерного адаптивного тестування вище звичайного комп'ютерного тестування, так як труднощі запропонованих завдань прагнуть відповідати рівню досягнень тестованого, отже, підвищується інформативність тесту і швидше досягається задана точність оцінювання результату, що також може скоротити тривалість тесту;

- комп'ютерне адаптивне тестування дозволяє розпізнавати не тільки тестованих з середнім рівнем досягнень, але і дає можливість виявити найбільш яскраві, видатні особистості.

Також однією з основних проблем є той факт, що заздалегідь невідомо, скільки запитань треба поставити тестованому, щоб визначити рівень його знань. Це пов'язано з тим, що в основі адаптивного підходу лежить індивідуалізація процедури відбору завдань тесту, яка за рахунок оптимізації складності завдань стосовно до рівня підготовленості здобувачів освіти забезпечує генерацію ефективних тестів [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існує багато публікацій на дану тематику, оскільки це питання є актуальним на поточний момент. Так, наприклад, автори роботи [3] пропонують метод формування оцінювання, котрий є альтернативою традиційним підходам до оцінювання знань та системам IPT (Item Response Theory). Алгоритм може зменшити кількість завдань, які має вирішити здобувач вищої освіти, і забезпечити більш швидкий спосіб визначення відповідного персоналізованого шляху навчання для здобувачів вищої освіти. Алгоритм визначає найслабші сфери знань здобувачів та вказує найпростіші пункти, з яких можна розпочати корекційне навчання.

В роботі [4] досліджувався вплив різних методів вибору завдань на інформаційну функцію тесту (TIF) та ефективність тесту в комп'ютерному адаптивному тестуванні (CAT). Дослідження проводилося з використанням змодельованих даних, а константами дослідження є розмір вибірки, розподіл параметрів здібностей, розмір пулу завдань, модель теорії відповідей на завдання (IRT) та розподіл параметрів завдань, метод оцінки здібностей, правило початку, контроль експозиції завдань та правило зупинки. Методи вибору завдань, які є незалежними змінними цього дослідження, – це критерій інтервальної інформації, збалансована за ефективністю інформація, значення -b відповідності, інформація Кульбака-Лейблера, максимальна інформація Фішера, інформація, зважена за правдоподібністю, та випадковий вибір. При порівнянні цих методів найкращі показники в аспекті TIF забезпечує метод максимальної інформації Фішера.

Робота [5] має на меті представити завдання, які статистично оптимізують процес оцінювання, враховуючи відповіді випробуваного та оцінені рівні. Нещодавні розробки в навчанні з підкріпленням та глибоких нейронних мережах надають адаптованому тестуванню потенціал для вибору завдань, які використовують більше інформації з усіх завдань, що залишилися, а не лише зосереджуються на наступних кількох завданнях, які потрібно вибрати. Автори переробили CAT відповідно до структури навчання з підкріпленням та пропонують нову стратегію вибору завдань, засновану на методі глибокої Q-мережі (DQN).

У статті [6] наводиться багатовимірне комп'ютеризоване адаптивне тестування для завдань з примусовим вибором (MFC-CAT), що поєднує переваги багатовимірних завдань з примусовим вибором (MFC) та комп'ютеризованого адаптивного тестування (CAT). Це дослідження пропонує набір нових методів вибору завдань на основі інформації KL для MFC-CAT (а саме MFC-KI, MFC-KB та MFC-KLP) на основі моделі Терстона IRT (TIRT). Було проведено три симуляційні дослідження, включаючи одне на основі реальних даних, для порівняння ефективності запропонованих методів вибору завдань на основі KL з існуючими методами на основі FI у тривимірних та п'ятивимірних сценаріях

MFC-CAT з різною тривалістю тестування та міжознаковими кореляціями.

В роботі [7] розглядається питання незацікавлених відповідей в комп'ютеризованих адаптивних тестах (КАТ). Незацікавлені відповіді (наприклад, швидкі здогадки), які не відображають справжній рівень здібностей учнів, можуть призвести до вибору менш інформативних завдань і тим самим забруднити процедури вибору завдань та оцінки здібностей. Це дослідження пропонує альтернативний метод вибору завдань, заснований на максимальному показнику інформації Фішера (MFI), який розглядає залученість до тестування як вторинну латентну ознаку для вибору найоптимальніших завдань на основі як здібностей, так і залученості. Результати досліджень постфактумного моделювання показали, що запропонований метод може оптимізувати вибір завдань та підвищити точність остаточних оцінок здібностей, особливо для учнів з низьким рівнем здібностей.

Важливою особливістю проектування як комп'ютеризованого адаптивного тестування, так і багатоетапного адаптивного тестування є використання відповідного методу вибору елементів. Очікується, що метод вибору елементів вибиратиме найоптимальніші елементи залежно від рівня здібностей випробуваних, враховуючи інші особливості проектування (наприклад, експозицію елементів та використання банку елементів). У роботі [8] було представлено колаборативну фільтрацію (CF) як новий метод вибору елементів у багатоетапній адаптивній тестовій системі, що збирається на льоту. Результати моделювання показали, що метод UBCF перевершує традиційні методи вибору елементів щодо точності вимірювання. Також метод IBCF продемонстрував найвищу продуктивність з точки зору використання банку елементів. Обговорюються обмеження поточного дослідження та напрямки майбутніх досліджень.

У дослідженні [9] проаналізовано можливість запровадження адаптивного комп'ютерного тестування з урахуванням рівня складності та часу виконання завдань. Запропоновано алгоритм, який змінює складність наступного завдання залежно від інтегральної оцінки попереднього, з порогом ефективності q . Імітаційне моделювання показало, що методика є гнучкою та ефективною, і може бути налаштована під індивідуальні особливості студентів і специфіку дисциплін.

Отже, використання методу адаптивного тестування як основи системи перевірки якості знань здобувачів є актуальним практичним завданням.

Мета статті

Побудова інтелектуальної системи оцінки якості знань здобувачів на основі адаптивного тестування.

Виклад основного матеріалу

В адаптивному тестуванні існує кілька підходів до формування завдань, які відрізняються за

складністю, гнучкістю та алгоритмічною побудовою. Одним із популярних підходів є теорія реагування на завдання, де завдання формуються на основі моделей, які враховують складність завдань, рівень підготовки тестованого та ймовірність правильної відповіді. Після кожної відповіді система оцінює рівень знань і підбирає наступне завдання з урахуванням оновленої оцінки.

Також слід зазначити класичний адаптивний алгоритм. В ньому завдання підбираються поступово – якщо відповідь правильна, то дається складніше завдання; якщо неправильна, то легше завдання. Існує також багаторівневе тестування: в ньому тест поділяється на блоки (модулі), кожен з яких має фіксовану складність. Після проходження першого блоку система обирає наступний блок відповідно до результату. Є також більш простий варіант поточного методу заснований на евристичці. В ньому перехід на більш складні рівні відбувається за правилами, наприклад, «при трьох підряд правильних відповідей перейти на більш складний рівень».

Окремо можна виділити ще аналіз статистичних результатів після проходження кожного питання тесту. Після кожної відповіді обчислюється апостеріорна ймовірність рівня знань і на її основі обирається наступне завдання.

В роботі було вирішено використовувати багаторівневе тестування, що складається з блочного методу.

В середині блоку на основі відповіді на попереднє завдання обирається наступне – з відповідним рівнем складності. У результаті кожен наступний крок формує індивідуальну структуру тесту, де адаптується не лише складність, але й розмір зміни між завданнями. Для переходу між блоками необхідно кожного разу розраховувати вагу питань для кожного типу блоку. Для розрахунку ваги питання кожного блоку використовується формула:

$$w = \frac{qt + 1}{qt} > 1,$$

де w – вага питання; qt – загальна кількість питань.

Вага питання повинна бути більше одиниці, оскільки лише в цьому випадку буде відбуватися перехід на наступний тип блоку. В розробленій системі використовується стандартизована вага питань, оптимальне значення ваги питань блоку було виявлено експериментальним шляхом та складає 1,14. Такий підхід дозволяє скоротити загальну кількість питань, зберігаючи при цьому змістовне наповнення перевірки для кожного блоку. Цей процес реалізується у вигляді циклічного алгоритму, де кожен етап спрямований на уточнення рівня знань на основі результатів поточних відповідей, представлений на рисунку 1.



Рис. 1 – Алгоритм змінно-розгалуженого багатокрокового тестування

Розроблений метод був реалізований у вигляді інтелектуальної системи тестування якості знань здобувачів, інтерфейс системи наведено на рисунку 2.

Основна функція «Тестування» доступна за допомогою команди меню «Тестування» пункту «Доступні тести», що наведено на рисунку 2. Після цього з'явиться вікно «Доступні тести», в якому можна обрати різні варіанти тестів для оцінки якості засвоєння знань студентів та обрати кнопку «Розпочати обраний тест». Після проходження тесту можна переглянути протокол тестування. Ця функція доступна через пункт меню «Тестування» команду «Протоколи тестів». Кожне питання з'являється у окремому вікні. Питання можуть бути чотирьох видів: тестові питання закритого типу з однією правильною відповіддю; тестові питання закритого типу з багатьма правильними відповідями; тестові завдання відкритого типу з можливістю

дописати слово; тестові завдання відкритого типу з можливістю дописати число.

Також можна переглянути, як працював адаптивний метод при формуванні питань в залежності від відповіді. Для цього є кнопка «Зміна рівнів». Рівень тестування змінюється залежно від кількості правильних відповідей у визначеній порції запитань. У випадку рисунка 3, перша відповідь була неправильною, тому навіть після трьох запитань підвищення не відбулося. Проте наступні три правильні відповіді (питання 4-6) забезпечили перехід на вищий рівень. Подібна ситуація повторюється з питаннями 7-9: одна помилка призупинила перехід, але три наступні правильні відповіді (10–12) дозволили перейти на рівень «добрий». Оскільки далі всі відповіді (13-15) були неправильні, система автоматично знизила рівень до «середній». Подальші зміни рівнів відбуваються за тим же принципом.

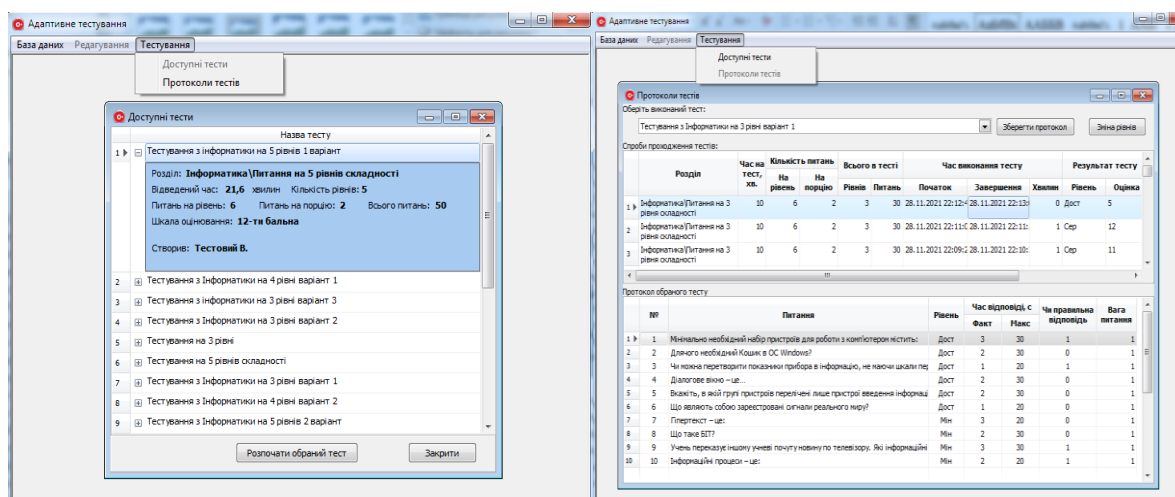


Рис. 2 – Інтерфейс розробленої системи

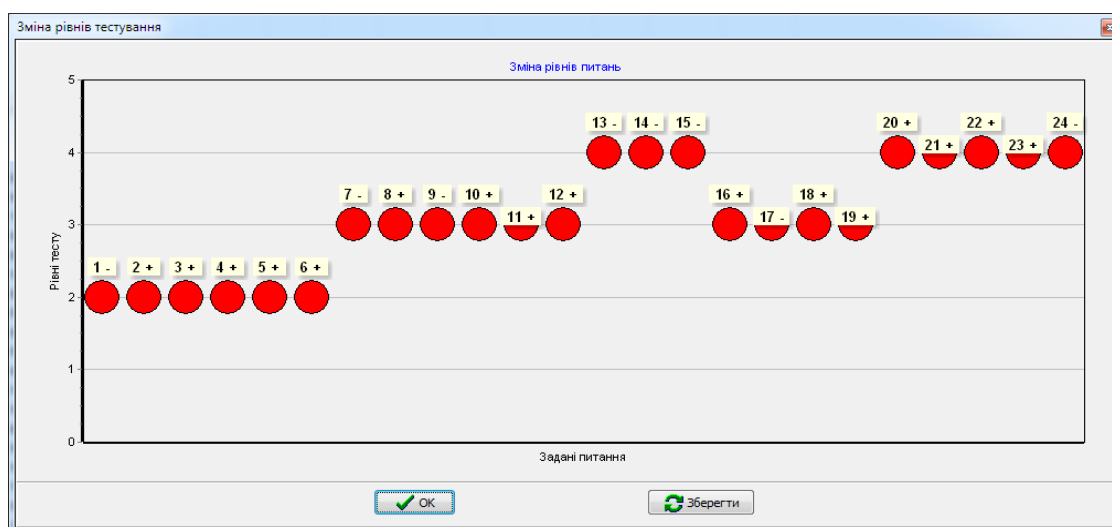


Рис. 3 – Приклад зміни рівнів при 4-х рівнях складності для тесту №5

В ході досліджень було виявлено, що є вплив кількості автоматично сформованих питань при адаптивному тестуванні на оцінку проходження тестів. Була замічена закономірність, що якщо здобувач має нестійкі знання та допускає часто помилки, то йому задається більше питань.

Таким чином, незалежно від того, яку стратегію побудови завдань обрано чи скільки їх включено до тесту, адаптивне оцінювання має гарантувати, що кожен сформований тест повною мірою відповідає змісту навчального матеріалу і точно відображає рівень підготовки здобувача

Висновки

Інформаційні технології поширилися і стали невід'ємною частиною всіх сфер життя сучасного суспільства, в тому числі освітнього середовища. З метою повноцінної реалізації існуючих можливостей повинні розроблятися особливі методи навчання, які розширять коло застосовуваних дидактичних прийомів.

Наразі комп'ютерне тестування має низку переваг перед традиційним тестуванням. Для контролю знань використовуються автоматизовані системи контролю знань і тестування, які дозволяють: полегшити роботу викладача при проведенні екзаменів і проміжних контролів; автоматизувати обробку результатів; зменшити витрати на організацію і проведення тестування; проводити тестування великої кількості здобувачів освіти з використанням широкого кола питань. Але поряд з цими перевагами мають місце і такі недоліки: відсутність залежності між використаними питаннями і відповідями, які отримуються від тестованого; питання вибираються з бази випадковим чином, тому що отримана оцінка ніяк не оцінює рівень підготовки здобувача вищої освіти з певної тематики і дуже залежить від випадковості.

Розроблена адаптивна система тестування адаптується до рівня знань здобувача з метою більш повної оцінки. Традиційно учасниками адаптивної системи є викладачі та здобувачі освіти. Викладачі заповнюють базу даних питаннями трьох основних типів (легкий, середній, складний) і встановлюють основні настройки тесту, такі як: кількість питань, кількість додаткових питань, мінімальний відсоток проходження, мінімальну і максимальну оцінку за тест. Адаптація по глибині опитування реалізується шляхом розбиття на рівні.

У подальшому планується удосконалити валідність тесту, що є найважливішим критерієм якості методу вимірювання. Валідність використовується для загальної характеристики тесту в аспекті відповідності одержаних результатів меті та вимогам оцінювання. А також застосувати наступні прийоми для визначення

валідності: аналіз бісеріального розподілу та аналіз індексу дискримінації.

Перелік використаних джерел

- [1] Radkevych O. Adaptive testing in the context of using electronic learning tools: essence, development and assessment. *Professional Pedagogics*. 2023. Vol. 1(26). Pp. 58-73. DOI: <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26.58-73>.
- [2] Василенко Я.П., Олексюк В.П. Особливості організації адаптивного тестування. *Сучасні цифрові технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, м. Тернопіль, 8 квітня, 2021. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2021. С. 11-14.
- [3] Meleško J., Ramanauskaitė S. Time saving students' formative assessment: Algorithm to balance number of tasks and result reliability. *Applied science*. 2021. Vol. 11, iss. 13. Article 6048. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11136048>.
- [4] Kürşad M.Ş. The Effects of Different Item Selection Methods on Test Information and Test Efficiency in Computer Adaptive Testing. *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*. 2022. Vol. 14, iss. 1. Pp. 33-46. DOI: <https://doi.org/10.21031/epod.1140757>.
- [5] Wang P., Liu H., Xu M. An adaptive testing item selection strategy via a deep reinforcement learning approach. *Behavior Research Methods*. 2024. Vol. 56. Pp. 8695-8714. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02498-x>.
- [6] Item selection methods in multidimensional computerized adaptive testing for forced-choice items using Thurstonian IRT model / Q. Wang et al. *Behavior Research Methods*. 2023. Vol. 56. Pp. 600-614. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-022-02037-6>.
- [7] Gorgun G., Bulut O. Incorporating test-taking engagement into the item selection algorithm in low-stakes computerized adaptive tests. *Large-scale Assessments in Education*. 2023. Vol. 11. Article 27. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40536-023-00177-5>.
- [8] Xiao J., Bulut O. Item Selection With Collaborative Filtering in On-The-Fly Multistage Adaptive Testing. *Applied Psychological Measurement*. 2022. Vol. 46, iss. 8. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1177/01466216221124089>.
- [9] Моделювання адаптивного тестування знань: поріг ефективності, рівень складності та час виконання завдань / О.Ф. Шевчук та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. № 1. С. 104-112. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-104-112>.

MODELING AND IMPLEMENTATION OF MULTI-LEVEL ADAPTIVE TESTING
IN AN INTELLIGENT SYSTEM

- Fedosova I.V.** D.Sc. (Pedagogical Sciences), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3923-8270>, e-mail: fedosova_i_v@pstu.edu;
- Pronina O.I.** PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7085-8027>, e-mail: pronina_o_i@pstu.edu;
- Veremiy V.O.** M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro

The article is devoted to considering an approach to improving the quality of the educational process by implementing computer adaptive testing. The work focuses on the problems of traditional knowledge assessment, such as the lack of individualization and subjectivity of the teacher, and offers adaptive methods of forming tests that take into account the level of preparation of the education seeker in real time. Various algorithms of adaptive testing are described. A method of multi-level testing with a block structure is also described, where tasks change in accordance with previous answers. This method was used as the basis of an information system for checking the quality of knowledge of applicants. A formula for calculating the transition between blocks that outline the level of knowledge in the test was given. The user interface, types of questions were also described, the implementation of the testing system was presented, and the mechanism for changing difficulty levels during the test was also presented. The system interface is user-friendly and provides support for various types of test tasks, which makes it universal for use in educational institutions. The developed multi-level structure of the test allows you to flexibly adapt not only the complexity, but also the logic of the transition between tasks, increasing the accuracy and objectivity of the assessment, as well as reducing the overall duration of testing. The implemented methodology demonstrates the practical feasibility and flexibility of implementing an adaptive approach into the system of automated knowledge control, which can become the basis for creating more effective educational technologies.

Keywords: adaptive testing, intelligent system, individual test trajectory, knowledge assessment.

References

- [1] O. Radkevych, «Adaptive testing in the context of using electronic learning tools: essence, development and assessment», *Professional Pedagogics*, vol. 1(26), pp. 58-73, 2023. doi: [10.32835/2707-3092.2023.26.58-73](https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26.58-73).
- [2] Ya.P. Vasylenko, and V.P. Oleksiuk, «Osoblyvosti orhanizatsii adaptivnoho testuvannia» [«Features of organizing adaptive testing»], in Proc. of the VII Int. Sci.-Pract. Internet-Conf. «Modern digital technologies and innovative teaching methods: experience, trends, prospects», Ternopil, 2021. Pp. 11-14. (Ukr.)
- [3] J. Meleško, and S. Ramanauskaitė, «Time saving students' formative assessment: Algorithm to balance number of tasks and result reliability», *Applied science*, vol. 11, iss. 13, article 6048, pp. 1-15, 2021. doi: [10.3390/app11136048](https://doi.org/10.3390/app11136048).
- [4] M.Ş. Kürşad, «The Effects of Different Item Selection Methods on Test Information and Test Efficiency in Computer Adaptive Testing», *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, vol. 14, iss. 1, pp. 33-46, 2022. doi: [10.21031/epod.1140757](https://doi.org/10.21031/epod.1140757).
- [5] P. Wang, H. Liu, and M.Xu, «An adaptive testing item selection strategy via a deep reinforcement learning approach», *Behavior Research Methods*, vol. 56, pp. 8695-8714, 2024. doi: [10.3758/s13428-024-02498-x](https://doi.org/10.3758/s13428-024-02498-x).
- [6] Q. Wang, Y. Zheng, K. Liu, Y. Cai, S. Peng, and D. Tu, «Item selection methods in multidimensional computerized adaptive testing for forced-choice items using Thurstonian IRT model», *Behavior Research Methods*, vol. 56, pp. 600-614, 2023. doi: [10.3758/s13428-022-02037-6](https://doi.org/10.3758/s13428-022-02037-6).
- [7] G. Gorgun, and O. Bulut, «Incorporating test-taking engagement into the item selection algorithm in low-stakes computerized adaptive tests», *Large-scale Assessments in Education*, vol. 11, article 27, 2023. doi: [10.1186/s40536-023-00177-5](https://doi.org/10.1186/s40536-023-00177-5).
- [8] J. Xiao, and O. Bulut, «Item Selection With Collaborative Filtering in On-The-Fly Multistage Adaptive Testing», *Applied Psychological Measurement*, vol. 46, iss. 8, pp. 1-15, 2022. doi: [10.1177/01466216221124089](https://doi.org/10.1177/01466216221124089).
- [9] O.F. Shevchuk, A.A. Yarovy, Yu.M. Panochyshyn, S.I. Petryshyn, and O.A. Kozlovskiy, «Modeliuvannia adaptivnoho testuvannia znan: porih efektyvnosti, riven skladnosti ta chas vykonannia zavdan» [«Modeling of Adaptive Knowledge Testing: Efficiency Threshold, Task Complexity and Completion Time»], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, № 1, pp. 104-112, 2025. doi: [10.31649/1997-9266-2025-178-1-104-112](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-104-112).

Стаття надійшла 13.05.2025
Стаття прийнята 02.06.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Федосова І.В., Проніна О.І., Веремій В.О. Моделювання та реалізація багаторівневого адаптивного тестування у інтелектуальній системі. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 50. С. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336246>.

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО ДОДАТКА
НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ХАРЧОВИХ ВІДХОДІВ ТА
ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЖИТТЯ НАСЕЛЕННЯ

Балалаєва О.Ю.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-4399 , e-mail: balalaeva_e_u@pstu.edu ;
Марченко І.Ф.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4566-3866 , e-mail: marchenko_i_f@pstu.edu ;
Браткевич В.П.	магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: bratkevych_v_p@students.pstu.edu ;
Соколова Н.О.	канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2493-3553 , e-mail: n.olegowna@gmail.com ;
Дереза А.Ю.	канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0632-2900 , e-mail: Dereza.A.Yu@nmu.one

У роботі проаналізовано процес розробки та використання мобільного додатка для зменшення харчових відходів та покращення якості життя населення на основі штучного інтелекту. Розглянуто глобальну проблему збільшення харчових відходів та необхідність усвідомленого споживання продуктів харчування, обґрунтовано доцільність використання сучасних цифрових технологій для зменшення відходів продуктів та оптимізації раціону користувачів. Проаналізовано існуючі інтелектуальні системи генерації рецептів на основі інвентаризації наявних продуктів, комплексні системи управління харчовими запасами з інтегрованим моніторингом термінів придатності, платформи для обміну надлишками їжі тощо. Розроблено власний мобільний додаток в середовищі Xcode за допомогою мови програмування Swift і технологій SwiftUI та OpenAI API, що використовує штучний інтелект для детального аналізу введених інгредієнтів та дієтичних уподобань користувачів. Програмний продукт забезпечує високий ступінь персоналізації рекомендацій завдяки алгоритмам машинного навчання та аналізу великих обсягів даних. Функціонал застосунку включає генерацію рецептів, що враховує залишки продуктів та дієтичні вподобання (веганство, вегетаріанство, безглютенова, безлактозна, палео-, кето- та низьковуглеводна дієти), а також відображення зображення страви, її назви, часу приготування, складності та послідовності кроків. Тестування мобільного додатка показало скорочення харчових відходів серед користувачів на 28%, що підтверджує потенціал технології у боротьбі з екологічними проблемами та економічними втратами. Зроблено висновок, що цифрові технологічні рішення з використанням штучного інтелекту мають не тільки екологічну, а й соціальну значущість, підвищуючи рівень усвідомленого споживання харчових продуктів серед населення.

Ключові слова: мобільний додаток, штучний інтелект, харчові відходи, зменшення відходів, усвідомлене споживання, машинне навчання, SwiftUI, OpenAI API.

Постановка проблеми

Згідно з даними ООН [1], щорічно близько однієї третини всього світового обсягу виробництва продовольства безцільно втрачається на різних етапах харчового ланцюга – від виробництва та переробки до роздрібної торгівлі та споживання домогосподарствами. Цей колосальний рівень харчових відходів має далекосяжні негативні наслідки, що охоплюють посилення змін клімату через викиди парникових газів, спричинені розкладанням органічних речовин, безповоротну втрату цінних природних ресурсів, включаючи воду, землю та енергію, а також значні економічні збитки для всіх учасників харчової системи. Звіт Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO) [1] підкреслює значний потенціал цифрових

технологій у боротьбі з проблемою харчових відходів на рівні домогосподарств. Застосування інтелектуальних мобільних додатків та онлайн-платформ може призвести до відчутного зниження витрат домогосподарств на продукти харчування, оцінюваного в межах 15-20%, завдяки більш ефективному плануванню покупок, оптимальному зберіганню продуктів та креативному використанню харчових залишків. Одночасно, такі технологічні рішення сприяють зменшенню екологічного сліду харчування та просувають принципи сталого розвитку, мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

У контексті стратегії, спрямованої на запобігання утворення харчових відходів на рівні домогосподарств та заохочення креативного та безпечного повторного використання харчових залишків, відповідні цифрові

рішення для формування більш стійкої та відповідальної моделі харчування набувають ключового значення [2]. Мобільні додатки, оснащені інтелектуальними функціями для підтримки цих стратегій, представляють собою перспективний інструмент для трансформації харчової поведінки споживачів. Завдяки більш точному прогнозуванню використання продуктів на основі цих персоналізованих даних, користувачі отримують можливість планувати свої страви більш ефективно, уникаючи надмірних закупівель та забезпечуючи своєчасне використання придбаних інгредієнтів. Програмні застосунки можуть аналізувати історію покупок користувача, його улюблені рецепти та терміни придатності наявних продуктів, щоб запропонувати оптимальні варіанти страв, які мінімізують ризик утворення відходів.

Таким чином, можна відзначити важливу роль цифрових технологій, особливо мобільних додатків, оснащених штучним інтелектом (ШІ) та функціями персоналізації, у вирішенні глобальної проблеми харчових відходів та сприянні переходу до більш сталого та відповідального споживання харчових продуктів [3]. Подальші дослідження та розробка в цій галузі мають вирішальне значення для розширення масштабів впровадження таких інноваційних рішень та максимізації їхнього позитивного впливу на економіку, навколишнє середовище та добробут суспільства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Інтелектуальні системи генерації рецептів на основі інвентаризації наявних продуктів, такі як додаток SuperCook [4], використовують складні алгоритми семантичного аналізу введених користувачем інгредієнтів, враховуючи не лише основні продукти, але й можливі комбінації спецій, трав та інших додаткових компонентів. Це дозволяє генерувати широкий спектр рецептів, від простих повсякденних страв до більш вишуканих кулінарних рішень, максимально використовуючи наявні харчові запаси. Вебзастосунок Recipe Radar [5], крім вже розглянутого функціоналу, надає можливість не тільки додати, але й виключити певні інгредієнти зі страви, хоча при цьому користувацький інтерфейс програє попередньому застосунку. Додаток Frigo Magic [6] розширює вищезазначені функціональні можливості, пропонуючи рецепти, розроблені професійними шеф-кухарями, що може не лише допомогти утилізувати залишки, але й надати користувачам нові кулінарні навички та ідеї. Програма також враховує сезонність продуктів та пропонує рецепти, що оптимально використовують інгредієнти, які знаходяться на піку своєї свіжості та доступності. Застосунок Yummly [7] також пропонує рецепти на основі введених користувачем інгредієнтів, при цьому враховуючи дієтичні вподобання. Серед переваг додатка слід зазначити персоналізацію, велику базу рецептів та зручний пошук. Онлайн-платформа Tesco Real Food [8] від корпорації Tesco надає широкі можливості генерації планів

харчування з урахуванням харчових вподобань, при цьому наявний модуль «Залишки» допомагає генерувати ідеї рецептів на основі продуктів, що залишилися, допомагаючи зменшити харчові відходи. Однією з ключових особливостей платформи є можливість додавати інгредієнти безпосередньо в онлайн-кошик, однак така інтеграція можлива тільки для мережі закладів з базами даних продуктів Tesco.

У статті [9] авторами представлено рекомендаційну систему SHARE, що створює персоналізовані плани харчування на основі історії здоров'я та вподобань користувача. Система використовує колаборативну фільтрацію для пошуку схожих дієтичних вподобань, а також враховує історію здоров'я, дієтичні вподобання та обмеження для забезпечення оптимального самопочуття.

У роботі [10] пропонується мобільний додаток Foodnomics на основі штучного інтелекту, який має на меті вирішення проблеми харчових відходів та підвищення обізнаності користувачів щодо економічних втрат та шкоді навколишньому середовищу. Застосунок дозволяє ідентифікувати залишки їжі з використанням методів розпізнавання зображення, а також оцінити розміри порцій та розрахувати можливі витрати. Серед позитивних моментів слід зазначити можливість відстежувати та зменшувати свої харчові відходи, однак наразі програма розпізнає тільки найбільш популярні продукти та потребує розширення навчальної вибірки.

Окремо слід зазначити програмні застосунки, які дозволяють перейти від універсальних рекомендацій до точної медицини в дієтології, що дозволяє користувачам не тільки оптимізувати раціон, але й покращити своє здоров'я на основі генетичного коду. Наприклад, платформа Nutrigenomix [11] надає персоналізовані рекомендації стосовно харчування на основі аналізу ДНК. Такі рекомендації стосуються оптимального споживання вітамінів, мінералів, білків, жирів, вуглеводів, а також чутливості до певних компонентів їжі. Мобільний додаток ZOE [12] для персоналізованого харчування також базується на науково-обґрунтованому підході, а саме – комплексному тестуванні біомаркерів, що дозволяє виявити біологічні реакції організму на різні харчові продукти. У результаті застосунок генерує тижневі плани харчування та рецепти з метою оптимізації мікробіому кишківника. Головним недоліком даних прикладень є висока вартість, що робить їх недоступними для широкого загалу.

Комплексні системи управління харчовими запасами з інтегрованим моніторингом термінів придатності та рекомендаціями щодо використання представлені такими мобільними додатками, як Kitcher [13], що виходить за рамки простого обліку продуктів, пропонуючи інтелектуальну систему управління харчовими запасами. Завдяки функціям оптичного розпізнавання символів (OCR) для аналізу чеків та сканування штрих-кодів, процес введення даних стає більш автоматизованим та менш трудомістким. Додаток не лише

нагадує про наближення термінів придатності, але й пропонує конкретні рецепти, які найкраще підходять для використання цих продуктів, мінімізуючи ризик їх псування. Розширені версії таких додатків можуть навіть інтегруватися з даними про середні темпи споживання різних продуктів у домогосподарстві, надаючи більш точні прогнози щодо того, які продукти слід використати в першу чергу.

Платформи для обміну надлишками їжі на рівні локальних спільнот також допомагають знизити рівень харчових відходів. Застосунок *Olio* [14] є прикладом платформи, яка сприяє не лише зменшенню відходів, але й зміцненню соціальних зв'язків у межах місцевих громад. Користувачі можуть пропонувати надлишки їжі (як готові страви, так і сирі продукти) своїм сусідам, запобігаючи таким чином їх потраплянню на смітник. Додаток *Too Good To Go* [15] спрямований на боротьбу з харчовими відходами через продаж залишків їжі в ресторанах та магазинах за зниженою ціною. Пропоновані «чарівні мішечки» (*surprise bags*) з їжею продаються за значно нижчими цінами, часто зі знижкою 50-70% від початкової вартості, при цьому користувачі таким способом підтримують місцеві заклади та допомагають їм зменшити збитки від непроданої їжі. Застосунок орієнтований на комерційний сегмент, але не вирішує проблему побутових відходів.

Перехід від спрощеного кількісного обліку калорій до комплексних інтелектуальних систем, що підтримують якісну оптимізацію використання харчових ресурсів, є важливим кроком на шляху до формування більш стійкої, економічно обґрунтованої та екологічно відповідальної парадигми харчування для майбутніх поколінь.

Вищенаведений огляд показав, що існуючі мобільні додатки, які орієнтовані на зменшення харчових відходів та оптимізацію споживання продуктів харчування, мають низку обмежень, що суттєво впливають на їхню ефективність та популярність серед користувачів. Першим важливим недоліком є низький рівень персоналізації рекомендацій. Більшість додатків пропонують загальні рекомендації, які не завжди відповідають індивідуальним харчовим уподобанням користувачів. Наприклад, хоча багато додатків дозволяють користувачам вводити список наявних продуктів, вони не завжди враховують специфічні дієтичні обмеження, такі як веганство, непереносимість лактози або глютену, та інші медичні чи етичні фактори. З іншого боку, програми, що враховують всі аспекти стану здоров'я користувача за медичними показниками, мають дуже високу вартість. Другим суттєвим недоліком є обмеженість у гнучкості та адаптивності рекомендацій. Існуючі додатки часто мають фіксовані рецепти, що не можуть бути легко модифіковані відповідно до змінних уподобань користувачів або до появи нових інгредієнтів. Це призводить до того, що рекомендації стають застарілими та менш корисними у повсякденному використанні. Третій аспект – недостатня інтеграція технологій машинного навчання та штучного інтелекту.

Хоча деякі додатки використовують елементи цих технологій, рівень їхньої складності та ефективності залишається досить низьким. У результаті користувачі отримують рекомендації, що базуються на простих алгоритмах збігу продуктів, а не на комплексному аналізі їхніх споживчих звичок та вподобань. Четвертою проблемою є недостатній рівень інтеграції з іншими цифровими сервісами, такими як онлайн-магазини продуктів харчування або сервіси доставки їжі. Відсутність таких інтеграцій обмежує практичну користь додатків, оскільки користувачі змушені вручну здійснювати закупівлі та планувати своє меню. Нарешті, користувацький досвід (UX/UI) у багатьох існуючих системах часто є складним та незручним для пересічного користувача, що знижує мотивацію регулярно користуватися додатком і тим самим зменшує загальну ефективність програми у боротьбі з харчовими відходами.

Мета статті

Метою даної роботи є створення мобільного додатка, що забезпечує персоналізовані рекомендації з використанням штучного інтелекту для зменшення харчових відходів та оптимізації раціону користувачів.

Виклад основного матеріалу

У даній статті авторами запропоновано власну розробку – додаток для зменшення харчових відходів та оптимізації споживання продуктів, що використовує штучний інтелект для детального аналізу введених інгредієнтів та дієтичних уподобань користувачів. Програмний продукт забезпечує високий ступінь персоналізації рекомендацій, завдяки алгоритмам машинного навчання та аналізу великих обсягів даних про харчові звички користувача.

Розробка додатку здійснювалася у середовищі Xcode (версія 16.0) – офіційному інтегрованому середовищі розробки від Apple. Основними інструментами розробки було обрано:

- Interface Builder для створення користувацького інтерфейсу;
- Simulator для тестування на різних пристроях;
- Instruments для оптимізації продуктивності.

Додаток побудовано з використанням SwiftUI, декларативного фреймворку від Apple для створення інтерфейсів користувача. SwiftUI дозволив створювати адаптивний та реактивний інтерфейс, який автоматично оновлюється при зміні даних. Використовувалися компоненти, такі як *NavigationStack*, *ScrollView*, *VStack*, *HStack*, *TextField*, *Button*, *Image* та *ProgressView*, для побудови інтуїтивно зрозумілого UI. Реактивні зв'язки даних через *@State*, *@Binding* та *@Published* забезпечували миттєве оновлення списку останніх рецептів.

Для збереження рецептів використовувався *UserDefaults*, вбудований механізм iOS для зберігання невеликих обсягів даних. Рецепти (структура *Recipe*) серіалізувалися в JSON за допомогою *JSONEncoder* та

зберігалися як Data. Реалізовано десеріалізацію через JSONDecoder для завантаження збережених рецептів. Додано підтримку збереження зображень страв у вигляді Data разом із текстовими даними рецептів.

Для генерації рецептів та зображень страв використовувався OpenAI API. Для генерації тексту використовувалася модель gpt-4o, яка забезпечує високоякісне створення структурованих JSON-відповідей із рецептами. Запити формувалися з урахуванням вибраних інгредієнтів та дієтичних уподобань, повертаючи дані у форматі {dishName, cookingTime, difficulty, steps}.

Модель для генерації зображень: використовувалася DALL·E 3 для створення зображень страв. Зображення генерувалися з роздільною здатністю 1024x1024 пікселів у форматі b64_json (base64-кодовані дані). Промпт для генерації: «A high-quality, appetizing image of [dishName], beautifully plated, in a bright and clean kitchen setting».

API-запити виконувалися асинхронно через URLSession з підтримкою async/await для забезпечення плавної роботи інтерфейсу. Використовувався ключ API OpenAI для аутентифікації запитів, забезпечуючи безпечний доступ до обох кінцевих точок (/v1/chat/completions та /v1/images/generations). Для виконання HTTP-запитів до OpenAI API

використовувався URLSession, вбудований фреймворк iOS. Реалізовано обробку JSON-відповідей через JSONDecoder для парсингу даних рецептів та зображень. Додано обробку помилок для відображення користувачу у разі збоїв (наприклад, втрата мережевого з'єднання або помилки парсингу).

У процесі розробки додатково застосовували:

– UIKit – використовувався обмежено, лише для конвертації Data у UIImage для відображення зображень страв у SwiftUI через Image(uiImage:);

– Combine – використовувався опосередковано через SwiftUI для реактивного оновлення даних за допомогою @Published у класі Storage.

Головний екран додатка «Ingredients» наведено на рис. 1а. При вході в програму користувач вводить наявні продукти («Selected Ingredients») та вибирає свої дієтичні вподобання/обмеження («Dietary Preferences»), серед яких може бути веганство (Vegan), вегетаріанство (Vegetarian), безглютенова дієта (Gluten-Free), безлактозна дієта (Dairy-Free), палео-дієта (Paleo), кето-дієта (Keto), низьковуглеводна дієта (Low-Carb).

Пошук за назвою робить додавання продуктів більш зручним. Коли користувач починає писати назву інгредієнту, у переліку йому пропунуються варіанти із бази даних, які найбільш співпадають з запитом (рис. 1б).

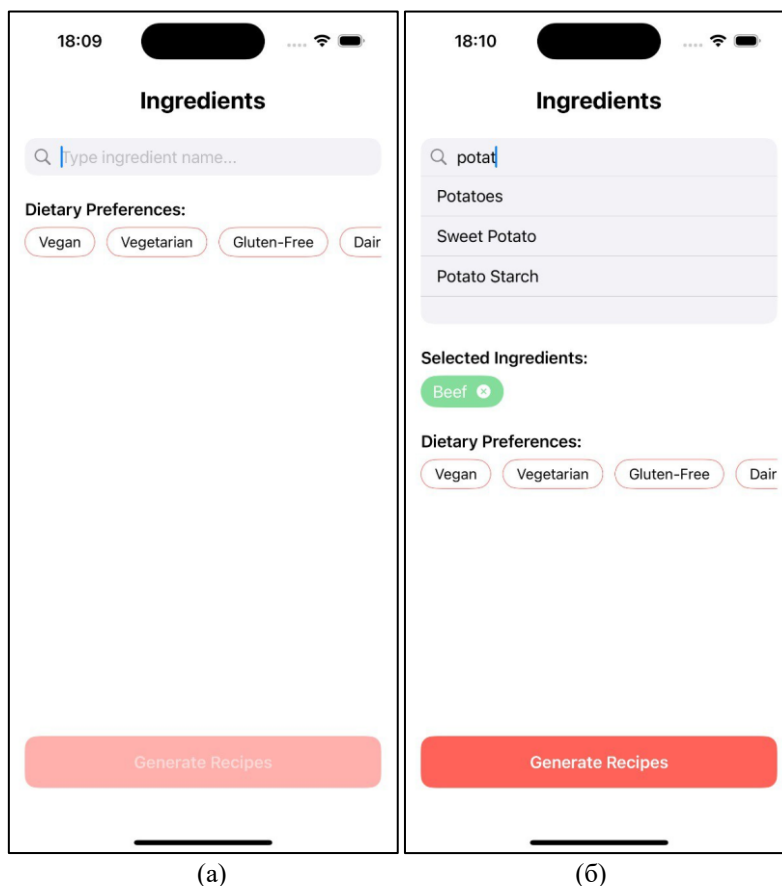


Рис. 1 – Головний екран додатка «Ingredients» (а) та пошук інгредієнта за назвою (б)

Після вибору інгредієнтів та дієтичних вподобань (за наявності таких) необхідно натиснути кнопку «Generate Recipes». У результаті на екрані з'являється згенерований рецепт, який включає: зображення страви, назву страви, час приготування, складність та послідовність кроків приготування (рис. 2а).

При поверненні на головний екран буде відображено останні згенеровані рецепти (рис. 2б) і користувач може їх відкрити знову в будь-який час, тому що вони зберігаються у поточному мобільному пристрої. Якщо спробувати повторно згенерувати рецепт з тими ж самими інгредієнтами та дієтичними вподобаннями, то ШІ запропонує іншу страву.

Розглянемо приклад роботи мобільного додатка. Нехай треба згенерувати рецепти страви з наступними інгредієнтами: цибуля (onion), капуста (cabbage), кабачок (zucchini), сир (cheese) для 3 варіантів дієтичних вподобань: а) без дієтичних обмежень; б) вегетаріанство; в) веганство.

У результаті додаток запропонував 3 різні рецепти, які включали усі інгредієнти та враховували відповідні дієтичні вподобання (рис. 3-5).

Апробація мобільного додатку тривала протягом трьох місяців та включала тестування серед різних

груп користувачів з різноманітними харчовими уподобаннями та потребами. Основною метою цього етапу було перевірити ефективність додатку у зменшенні харчових відходів та покращенні якості харчування користувачів шляхом персоналізації рекомендацій.

Учасники тестування були відібрані з різних соціальних груп: студенти, молоді сім'ї, літні люди, а також особи зі специфічними дієтичними вимогами (вегани, люди з непереносимістю лактози, глютену тощо). Загалом участь у тестуванні взяли понад 150 осіб. Кожен учасник отримав доступ до повної версії додатку, з інструкціями щодо його використання. Тестування передбачало регулярне введення інформації про наявні продукти та дієтичні вподобання, після чого система пропонувала персоналізовані рецепти та рекомендації щодо їх використання.

Протягом періоду тестування проводилися щотижневі опитування для збору зворотного зв'язку від користувачів. Крім того, автоматично збиралися дані про частоту використання додатку, кількість згенерованих рецептів, типи обраних рецептів та відгуки щодо їхньої зручності й ефективності.

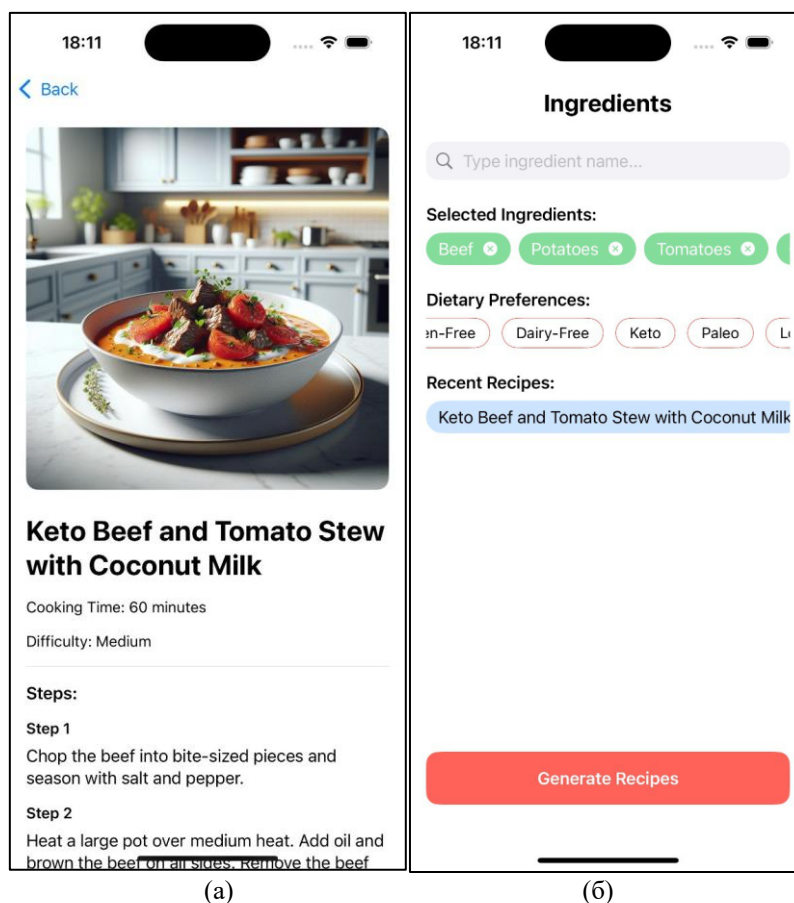


Рис. 2 – Згенерований рецепт страви (а) та відображення раніше згенерованих рецептів (б)

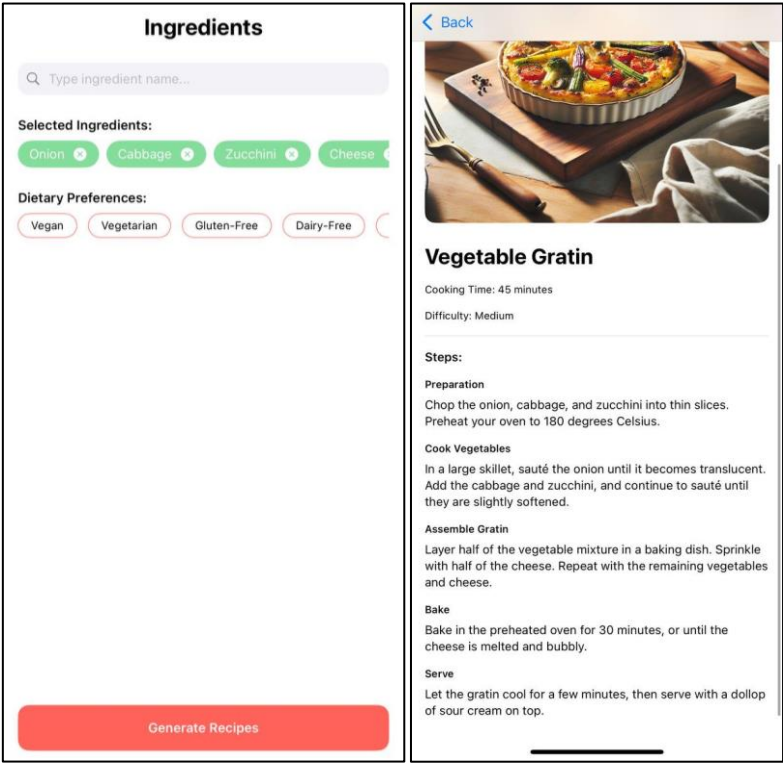


Рис. 3 – Згенерований рецепт страви з цибулі, капусти, кабачка, сиру

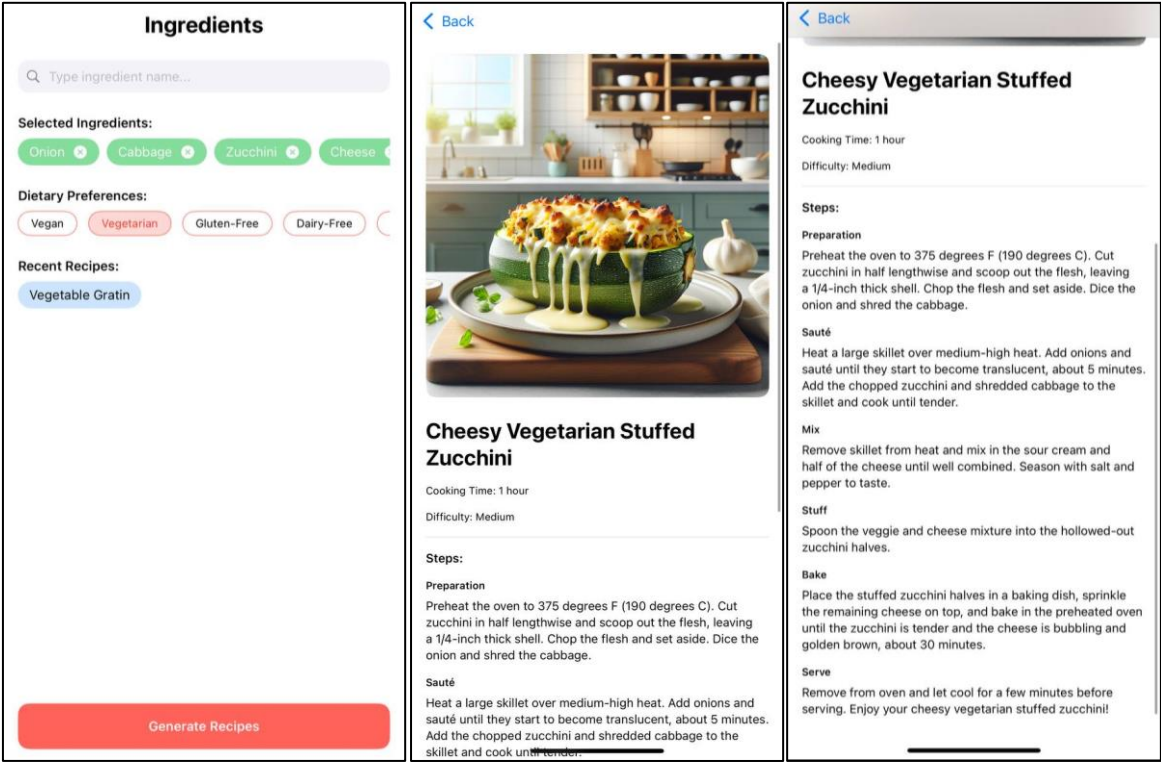


Рис. 4 – Згенерований вегетаріанський рецепт страви

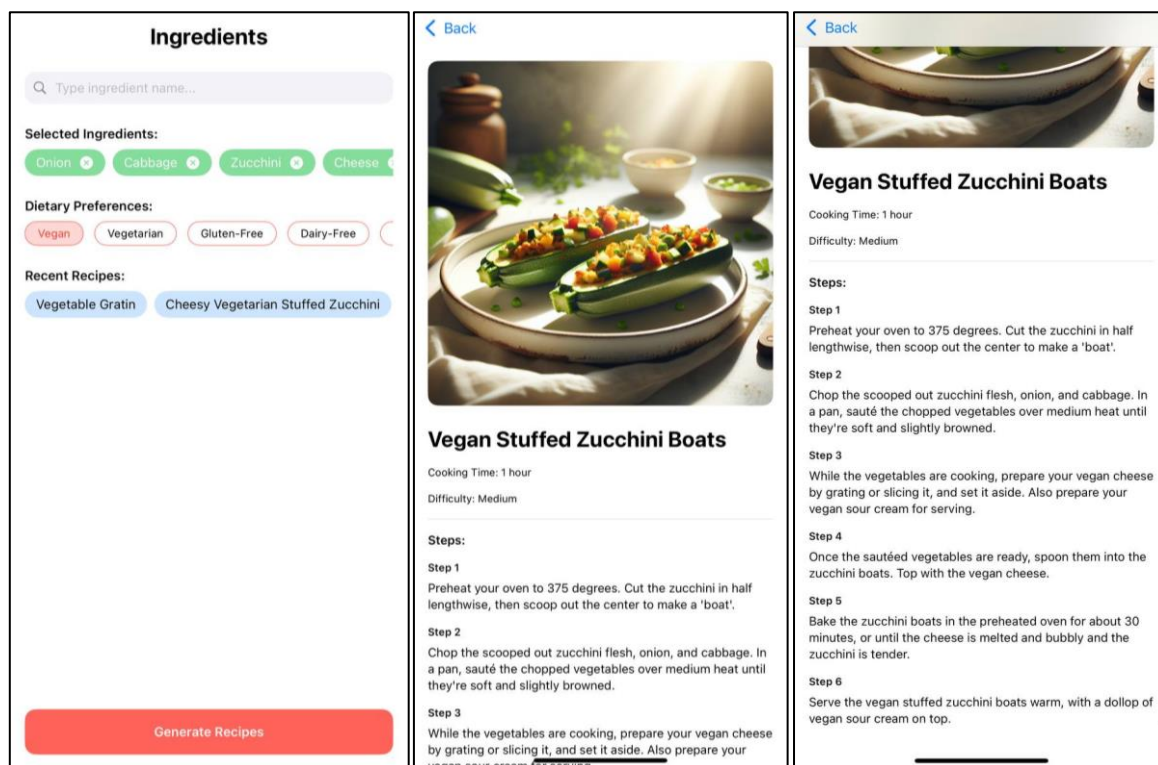


Рис. 5 – Згенерований веганський рецепт страви

Результати апробації додатку показали значне покращення поведінки учасників щодо управління своїми продуктами харчування. Понад 75% учасників повідомили про суттєве скорочення харчових відходів завдяки використанню додатку. Близько 80% учасників зазначили, що додаток допоміг їм більш ефективно планувати покупки та раціонально використовувати наявні продукти. З точки зору користувацького досвіду, більшість учасників оцінили інтуїтивність та зручність інтерфейсу як високу, хоча було висловлено кілька рекомендацій щодо подальшого покращення взаємодії користувача з додатком, зокрема спрощення навігації та додавання додаткових функцій. Зібрані дані також дозволили визначити напрями подальшого розвитку додатку, такі як поглиблена інтеграція з сервісами доставки продуктів, покращення алгоритмів штучного інтелекту для більш точної персоналізації та розширення функціоналу для підтримки більш складних сценаріїв використання.

Таким чином, апробація додатка продемонструвала його перспективність та здатність суттєво впливати на зменшення харчових відходів і покращення якості харчування серед різних категорій користувачів.

Висновки

Розроблений мобільний додаток з інтеграцією штучного інтелекту довів високу ефективність у вирішенні проблеми харчових відходів, забезпечуючи персоналізовані та адаптивні рекомендації користувачам.

Застосування сучасних технологій, таких як Swift, SwiftUI та OpenAI API, дозволило створити зручний і функціональний додаток, який активно сприяє підвищенню якості життя населення через оптимізацію харчування.

При генерації рецептів враховуються не тільки залишки продуктів, наявні у користувача, але й такі дієтичні вподобання або обмеження, як веганство, вегетаріанство, безглютенова дієта, безлактозна дієта, палеодієта, кето-дієта, низьковуглеводна дієта. Запропонований рецепт включає зображення страви, назву страви, час приготування, складність та послідовність кроків приготування. Згенеровані рецепти зберігаються на пристрої користувача та доступні в будь-який час. При повторній генерації рецепта з однаковими інгредієнтами буде запропоновано іншу страву.

Тестування мобільного додатка показало значне скорочення харчових відходів (на 28%) серед користувачів, що підтверджує потенціал технології у боротьбі з екологічними проблемами та економічними втратами. Подальші розробки мають включати інтеграцію з додатковими сервісами доставки продуктів та покращення алгоритмів машинного навчання для ще більш точних і релевантних рекомендацій.

Таким чином, цифрові технологічні рішення з використанням штучного інтелекту мають не тільки екологічну, а й соціальну значущість, підвищуючи рівень усвідомленого споживання харчових продуктів серед населення.

Перелік використаних джерел

- [1] United Nations Environment Programme. Food Waste Index Report; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2021.
- [2] Kolawole O.A., Owoigbe K.V. Role of Digital Technologies in Reducing Food Waste and Loss in Agricultural Supply Chains. *Iconic Research And Engineering Journals*. 2025. Vol. 8, iss. 1. Pp. 479-487.
- [3] Impact of Generative AI on Food Supply Chain Management / Chahal B.P.S. et al. IGI Global Publication, 2025. 460 p. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-9856-2>.
- [4] SuperCook official website. URL: <https://www.supercook.com> (дата звернення 18.12.2024).
- [5] Recipe Radar official website. URL: <https://www.recipe-radar.com> (дата звернення 25.12.2024).
- [6] Frigo Magic official website. URL: <https://www.frigomagic.com> (дата звернення 03.12.2024).
- [7] Yummly official website. URL: <https://www.yummly.com> (дата звернення 03.12.2024).
- [8] Tesco Real Food official website. URL: <https://www.realfood.tesco.com> (дата звернення 05.12.2024).
- [9] Zioutos K., Kondylakis H., Stefanidis K. Healthy Personalized Recipe Recommendations for Weekly Meal Planning. *Computers*. 2024. Vol. 13(1), iss. 1. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers13010001>.
- [10] Liu J.Q., Boulom T. An AI-Powered Mobile Application for Reducing Food Waste through Cost Estimation and user Awareness. *Proceedings of 6th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data*, Zurich, Switzerland, 18-19 January 2025. Pp. 37-45. DOI: <https://doi.org/10.5121/csit.2024.150104>.
- [11] Nutrigenomix official website. URL: <https://www.nutrigenomix.com> (дата звернення 14.12.2024).
- [12] ZOE official website. URL: <https://www.zoe.com> (дата звернення 14.12.2024).
- [13] Kitchie official website. URL: <https://www.kitchie.co> (дата звернення 15.12.2024).
- [14] Olio official website. URL: <https://www.olioapp.com> (дата звернення 21.12.2024).
- [15] Too Good To Go official website. URL: <https://www.toogoodtogo.com/> (дата звернення 10.12.2024).

DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO REDUCE FOOD WASTE AND IMPROVE THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION

Balalaieva O.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-4399 , e-mail: balalaieva_e_u@pstu.edu ;
Marchenko I.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4566-3866 , e-mail: marchenko_i_f@pstu.edu ;
Bratkevych V.	M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: bratkevych_v_p@students.pstu.edu ;
Sokolova N.	PhD (Engineering), associate professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2493-3553 , e-mail: n.olegowna@gmail.com ;
Dereza A.	PhD (Engineering), associate professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0632-2900 , e-mail: Dereza.A.Yu@nmu.one

The paper analyzes the process of developing and using a mobile application to reduce food waste and improve the quality of life of the population based on artificial intelligence. The global problem of increasing food waste and the need for conscious food consumption are considered, the feasibility of using modern digital technologies to reduce food waste and optimize users' diets is substantiated. Existing intelligent recipe generation systems based on inventory of available products, complex food stock management systems with integrated expiration date monitoring, platforms for exchanging surplus food, etc. are analyzed. Our own mobile application was developed in the Xcode environment using the Swift programming language and SwiftUI and OpenAI API technologies, which uses artificial intelligence for detailed analysis of the entered ingredients and dietary preferences of users. The software product provides a high degree of personalization of recommendations thanks to machine learning algorithms and analysis of large amounts of data. The application's functionality includes recipe generation that takes into account leftovers and dietary preferences (veganism, vegetarianism, gluten-free, lactose-free, paleo, keto and low-carb diets), as well as displaying an image of the dish, its name, cooking time, complexity and sequence of steps. Testing of the mobile application showed a reduction in food waste among users by 28%, which confirms the potential of the technology in combating environmental problems and economic losses. It

was concluded that digital technological solutions using artificial intelligence have not only environmental, but also social significance, increasing the level of conscious consumption of food products among the population.

Keywords: mobile application, artificial intelligence, food waste, waste reduction, conscious consumption, machine learning, SwiftUI, OpenAI API.

References

- [1] United Nations Environment Programme. Food Waste Index Report; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2021.
- [2] O.A. Kolawole, and K.V. Owoigbe, «Role of Digital Technologies in Reducing Food Waste and Loss in Agricultural Supply Chains». *Iconic Research And Engineering Journals*. 2025. Vol. 8, iss. 1. Pp. 479-487.
- [3] B. Chahal, A. David, A. Singh, G. Madaan, and G. Singh, *Impact of Generative AI on Food Supply Chain Management*. IGI Global Publication, 2025. doi: 10.4018/979-8-3693-9856-2.
- [4] SuperCook official website. [Online]. Available: <https://www.supercook.com>. Accessed on: December 18, 2024.
- [5] Recipe Radar official website. [Online]. Available: <https://www.reciperadar.com>. Accessed on: December 25, 2024.
- [6] Frigo Magic official website. [Online]. Available: <https://www.frigomagic.com>. Accessed on: December 03, 2024.
- [7] Yummly official website. [Online]. Available: <https://www.yummly.com>. Accessed on: December 03, 2024.
- [8] Tesco Real Food official website. [Online]. Available: <https://www.realfood.tesco.com>. Accessed on: December 05, 2024.
- [9] K. Zioutos, H. Kondylakis, and K. Stefanidis, «Healthy Personalized Recipe Recommendations for Weekly Meal Planning», *Computers*, vol. 13(1), iss. 1, pp. 1-13, 2024. doi: 10.3390/computers13010001.
- [10] J.Q. Liu, and T. Boulom, «An AI-Powered Mobile Application for Reducing Food Waste through Cost Estimation and user Awareness», in Proceedings of 6th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data, Zurich, Switzerland, 2025, pp. 37-45. doi: 10.5121/csit.2024.150104.
- [11] Nutrigenomix official website. [Online]. Available: <https://www.nutrigenomix.com>. Accessed on: December 14, 2024.
- [12] ZOE official website. [Online]. Available: <https://www.zoe.com>. Accessed on: December 14, 2024.
- [13] Kitche official website. [Online]. Available: <https://www.kitche.co>. Accessed on: December 15, 2024.
- [14] Olio official website. [Online]. Available: <https://www.olioapp.com>. Accessed on: December 21, 2024.
- [15] Too Good To Go official website. [Online]. Available: <https://www.toogoodtogo.com/>. Accessed on: December 10, 2024.

Стаття надійшла 23.04.2025

Стаття прийнята 17.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Розробка мобільного додатка на основі штучного інтелекту для зменшення харчових відходів та покращення якості життя населення / Балалаєва О.Ю., Марченко І.Ф., Браткевич В.П., Соколова Н.О. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 31-39. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336248>.

СТАН РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ В УПРАВЛІННІ ЛЮДСЬКИМИ РЕСУРСАМИ

Неня А.В.	канд. техн. наук, доцент, Сумський державний університет, м. Суми, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2003-3531 , e-mail: a.nenia@itp.sumdu.edu.ua ;
Нестеров О.О.	аспірант, Сумський державний університет, м. Суми;
Бузнiк О.О.	студент, Сумський державний університет, м. Суми, e-mail: oleksandr.buznik@student.sumdu.edu.ua

Дослідження пов'язане з розробкою інформаційних технологій, призначених для підвищення ефективності та результативності процесів прийняття рішень у сфері управління людськими ресурсами. Ефективне управління людськими ресурсами є критично важливим аспектом діяльності сучасних організацій, оскільки воно відіграє ключову роль у визначенні їхньої конкурентоспроможності та довгострокового успіху. Поява великих даних поставила перед фахівцями з управління людськими ресурсами завдання ефективної навігації у величезних обсягах інформації. Ця інформація охоплює пошук даних, відбір, комунікацію та взаємодію з кандидатами і працівниками. Інтеграція інформаційних технологій у процеси управління людськими ресурсами має потенціал для автоматизації рутинних бізнес-задач і спрощення процесів прийняття рішень, особливо коли ці рішення ґрунтуються на висновках, отриманих в результаті аналізу комплексного набору даних з різних джерел. У статті представлено комплексний огляд методів застосування сучасних алгоритмів штучного інтелекту для аналізу структурованих і неструктурованих даних, які є типовими для управління людськими ресурсами. У статті досліджується потенціал генеративних моделей штучного інтелекту (GPT і BERT), глибокого навчання та обробки природної мови для підтримки прийняття рішень. Розглядається можливість інтеграції особистих якостей кандидатів в оцінку їхньої придатності до роботи на вакантних посадах шляхом застосування методів глибокого навчання. Автори пропонують при розвитку інформаційних технологій використовувати комбінацію ар-підходів для досягнення більшої автоматизації процесів підбору кандидатів, аналізу резюме, комунікації з кандидатами та персоналізації взаємодії.

Ключові слова: управління людськими ресурсами, GPT, Deep Learning, NLP, підтримка прийняття рішень, аналіз великих наборів даних, віртуальний асистент.

Постановка проблеми

Управління людськими ресурсами має вирішальне значення для діяльності будь-якої організації, оскільки безпосередньо впливає на її конкурентоспроможність та розвиток. Сучасний ринок праці ставить перед фахівцями з управління персоналом нові виклики, зокрема, необхідність оперативно знаходити та відбирати відповідних кандидатів, ефективно комунікувати з ними та організовувати взаємодію в рамках бізнес-процесів. Цифровізація процесів управління персоналом в порівнянні з традиційними підходами дає змогу вивести спеціалізовані бізнес-процеси на якісно вищий технологічно-організаційний рівень [1].

Особливу роль у цьому процесі відіграє аналіз даних з відкритих джерел, таких як професійні мережі, соціальні мережі, онлайн-резюме та відгуки. Інтеграція сучасних інформаційних технологій сприяє автоматизації цих завдань та створенню систем підтримки прийняття рішень, які спираються на результати аналізу складних та різномірних даних [2].

Метою цього дослідження є аналіз сучасного стану розвитку інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в управлінні людськими ресурсами з акцентом на інтеграцію новітніх алгоритмів штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI) для аналізу структурованих та напівструктурованих даних. У цьому контексті особлива увага приділяється використанню

генеративного AI – підходу, який дозволяє автоматично ідентифікувати та категоризувати дані, а також генерувати відповіді на запити кандидатів і планувати взаємодію, наприклад, дзвінки або зустрічі. Інтеграція цієї технології має потенціал для підвищення продуктивності праці фахівців з управління персоналом, надаючи їм інструменти, які сприяють ефективному і точному підбору кандидатів, а також ефективній організації комунікації.

Одне з основних кадрових завдань, яке потребує автоматизації, – це пошук відповідних кандидатів. Цей процес передбачає вивчення різноманітних даних, включаючи резюме, професійні профілі в соціальних мережах та іншу відповідну інформацію. У цьому контексті професійні соціальні мережі, такі як LinkedIn, Xing, стають важливим джерелом відповідної інформації. Водночас, етичні міркування, притаманні використанню даних, вирішуються завдяки тому, що підсистема збору даних аналізує виключно ті зображення, які користувач публікує в професійній мережі. Розміщуючи зображення на публічному акаунті, користувач фактично дає згоду на їх використання відповідно до умов публічності профілю [3].

Використання технологій глибокого навчання та генеративного штучного інтелекту сприяє швидкому визначенню найбільш підходящих кандидатів на основі ключових характеристик, що дозволяє проводити

порівняльний аналіз з вимогами вакансії. Крім того, автоматизація комунікації є ключовим компонентом у процесі взаємодії з потенційними працівниками. Системи на основі генеративного AI здатні створювати персоналізовані електронні листи, відповідати на типові запити та допомагати з плануванням зустрічей, включаючи інтеграцію в календарі для полегшення дзвінків або переговорів [4].

Таким чином, генеративний AI не лише автоматизує рутинні процеси, але й відкриває можливості для більш ефективного аналізу та прийняття рішень у сфері управління людськими ресурсами. Зростаючий інтерес до автоматизації процесів рекрутингу в Україні [5] спонукає авторів провести дослідження сучасного стану розвитку технологій AI з метою визначення комбінації останніх для їх впровадження при реалізації базових бізнес-задач рекрутингу віртуальним асистентом менеджера найму персоналу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У дослідженні Hewage, A. [6] було розглянуто використання штучного інтелекту в контексті підбору та відбору персоналу в галузі управління людськими ресурсами (HRM). Дане дослідження робить цінний теоретичний внесок у вигляді концептуальної моделі, яка має на меті сприяти більш глибокому розумінню ефективного використання AI в процесах набору та відбору персоналу. Дослідження спирається на теорію впровадження технологій в інформаційні системи та розширює її, інтегруючи літературу з управління персоналом. Результати цього дослідження вказують на те, що штучний інтелект придатний для використання на певних етапах рекрутингу, таких як пошук кандидатів, попередній відбір та залучення кандидатів, та можуть бути корисними для розроблення інтеграції штучного інтелекту у процес підбору персоналу.

Серед вітчизняних науковців було розглянуто роботи автора Орехова Д. [7] та колективна робота авторів Піддубна Л. та Чуєва І. [8]. Стаття Орехова Д. розглядає сфери застосування AI в управлінні сучасними підприємствами. Автор аналізує основні компоненти AI, включаючи машинне навчання, обробку природної мови, робототехніку та інтелектуальних агентів, і визначає їх використання в управлінських процесах, таких як виробництво, маркетинг, фінанси, людські ресурси тощо. Автор підкреслює, що хоча AI пропонує значний потенціал для підвищення конкурентоспроможності, його поточне впровадження залишається обмеженим – лише 22% підприємств регулярно використовують його. Отже, подальше дослідження цього напрямку досі є актуальним і перспективним.

Колективна робота авторів Піддубна Л. та Чуєва І. присвячена дослідженню використання цифрових технологій в контексті управління HR в інформаційно-технологічних (IT) компаніях. У статті розглядаються такі інноваційні методи, як штучний інтелект, чат-боти, блокчейн, хмарні технології, віртуальна та доповнена

реальність, які допомагають автоматизувати HR-процеси та підвищити продуктивність праці. Аналіз міжнародного досвіду демонструє, що ці технології забезпечують конкурентні переваги та покращують умови праці. Українським IT-компаніям рекомендується розглянути можливість впровадження таких інновацій, як CloudERP для управління даними, блокчейн для безпечного доступу до інформації про співробітників та віртуальну реальність для навчання персоналу.

Інтеграція AI в управління людськими ресурсами, зокрема розпізнавання образів, сприяє автоматизації підбору, оцінки та розвитку персоналу. Використання комп'ютерного зору полегшує аналіз фото- та відеодокументації для оцінки емоційного стану, рівня впевненості та професійної поведінки за невербальними сигналами. Ці технології також використовуються для верифікації особи, підтвердження автентичності документів. Переваги таких рішень численні, включаючи зменшення людської упередженості, прискорення аналізу даних і підвищення точності оцінок за рахунок виявлення деталей, які часто залишаються поза увагою при традиційному аналізі [9].

Однак існують проблеми, які слід враховувати, зокрема забезпечення етичного використання біометричних даних, дотримання конфіденційності та правових вимог, а також уникнення упередженості в навчальних вибірках.

Незважаючи на ці виклики, AI має значний потенціал для вдосконалення практики управління персоналом за умов дотримання правових, етичних і технічних стандартів. Таким чином, з'являється можливість ефективно використовувати технології для підтримки прийняття об'єктивних кадрових рішень.

Розглянемо детальніше особливості сучасних інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в управлінні людськими ресурсами, які базуються на складних алгоритмах і моделях AI. Варто зазначити, що генеративні моделі, глибоке навчання та обробка природної мови відіграють ключову роль у таких системах. Ці технології сприяють автоматизації аналізу даних, що дозволяє досліджувати великі обсяги різноманітних даних. Дані отримують з безлічі джерел, включаючи внутрішні корпоративні дані та зовнішні джерела, такі як соціальні мережі та публічні профілі [10].

У дослідженні Kumah, Peace Nketia, Ivonne Kuma Yaokumah, Winfred Asante-Offei, Kwame Okwabi вивчається вплив генеративного AI на управління людськими ресурсами, зокрема на організаційну прихильність, залученість працівників і продуктивність [11]. У дослідженні вивчалася посередницька роль довіри у взаємозв'язку між сприйняттям користувачів та організаційною прихильністю. Опитування IT-працівників оцінювало дев'ять конструктивів, включаючи сприйняття користувачами (простота використання та корисність) та залученість працівників (енергійність та відданість). Результати продемонстрували позитивний і статистично значущий вплив між цими конструктами, причому

довіра частково опосередковує ці зв'язки. Наведені у публікації результати дослідження ґрунтуються на теоріях технологічної готовності та прийняття технологій, забезпечуючи таким чином основу для майбутніх між-дисциплінарних досліджень генеративного AI.

Розгортання генеративних моделей на основі сучасних архітектур, таких як GPT (Generative Pre-trained Transformer) і BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) (рис. 1), стало ключовим аспектом оптимізації комунікації та обробки даних у різних сферах, включаючи управління персоналом. Ці моделі використовують глибоке навчання для обробки великих обсягів текстових даних і генерування відповідей, що особливо корисно для персоналізації взаємодії з кандидатами [12].

У порівняльному дослідженні Raman, Raghu, Venugopalan та Kamal, Anju оцінили ефективність GPT і Bard у виконанні HR-завдань, використовуючи набір із 134 запитань [14]. Оцінка відповідей, наданих обома програмами, базувалася на трьох критеріях: точність, релевантність і зрозумілість. Результати показали, що GPT продемонструвала вищу загальну точність (84,3% проти 82,8%), хоча ці розбіжності не були постійно статистично значущими. Це свідчить про те, що ці інструменти можуть доповнювати один одного, а не конкурувати між собою. Включення запитів на підтвердження не підвищило точність, а залучення HR-фахівців на етапі розробки могло б ще більше покращити роботу

моделей.

На рисунку 2 представлено архітектуру моделі GPT. Дана архітектура базується на декодерній частині трансформерів, а також використовує самопильну увагу (self-attention) для генерації інформації.

Генеративний попередньо навчений перетворювач (GPT) є прикладом трансформаційної архітектури, що демонструє здатність генерувати зв'язний текст на основі попередніх даних. Такі моделі дозволяють автоматизувати такі завдання, як створення електронних листів, відповіді на запити кандидатів або навіть створення звітів. У сфері HRM технологію GPT можна використовувати для розробки індивідуальних запрошень на співбесіди, відповідей на поширені запитання потенційних кандидатів або навіть для створення професійних профілів на основі даних, витягнутих з резюме та інших загальнодоступних джерел [16].

На відміну від GPT, BERT призначений для розуміння контекстуальних нюансів. Його двонаправлений характер дозволяє аналізувати текст з контекстом як ліворуч, так і праворуч від слова, що робить його надзвичайно ефективним інструментом для аналізу резюме та профілів кандидатів. Це дозволяє системам на основі BERT автоматично витягати релевантну інформацію, тим самим покращуючи пошук кандидатів і категоризацію даних [17].

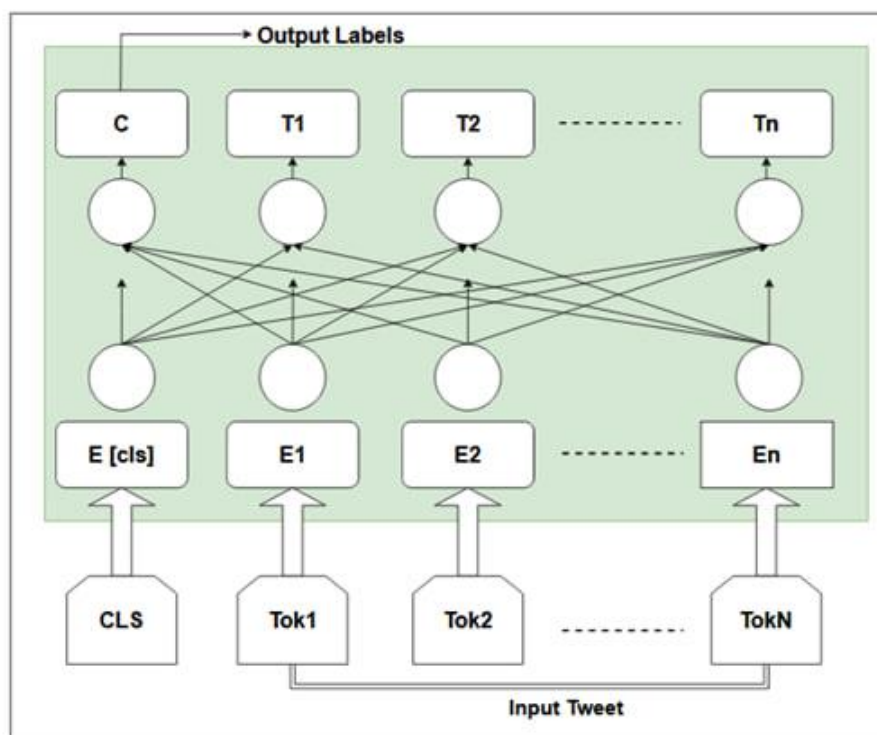


Рис. 1 – Вигляд архітектури моделі BERT [13]

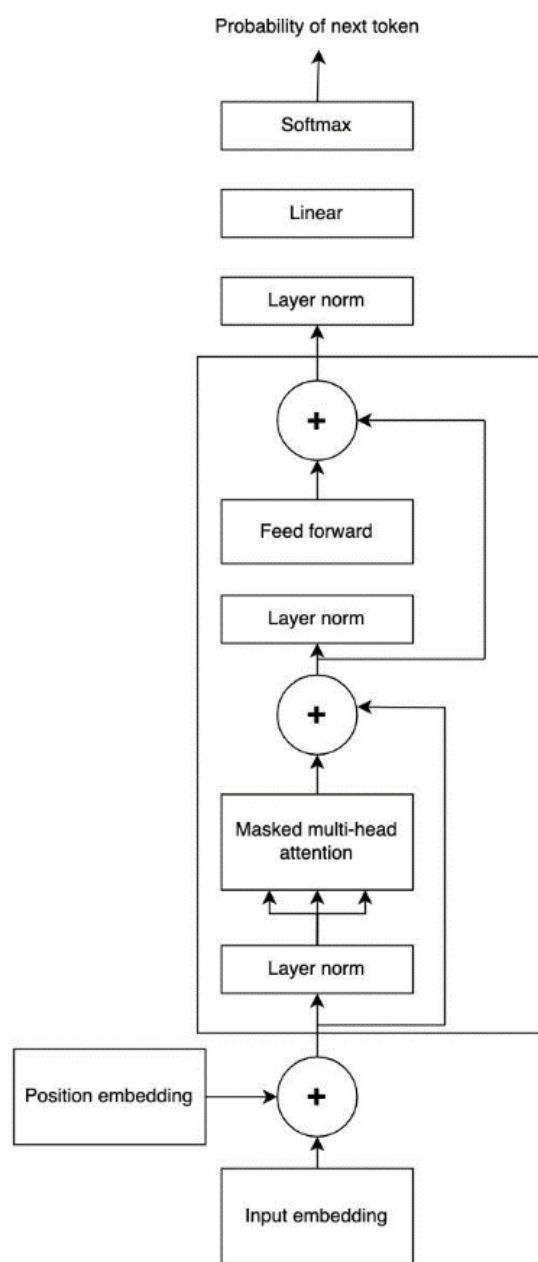


Рис. 2 – Вигляд архітектури моделі GPT [15]

Глибоке навчання (Deep Learning, DL) є важливою методологією для аналізу значних обсягів структурованих і напівструктурованих даних у сфері HRM. Використання нейронних мереж дозволяє оперативну обробляти дані, включаючи резюме кандидатів, профілі компаній та інформацію, отриману з соціальних мереж. Однією з основних можливостей глибокого навчання є категоризація людей та організацій. Системи здатні автоматично класифікувати кандидатів на основі їхніх професійних навичок і досвіду, визначаючи релевантні ключові слова з їхніх резюме [18].

Більше того, нейронні мережі можуть навчатися на історичних даних, щоб прогнозувати тенденції на ринку праці або продажів, тим самим дозволяючи бізнесу зосередитися на найбільш перспективних кандидатах і партнерах. Застосування методів DL має потенціал для підвищення ефективності низки бізнес-функцій. Автоматизуючи процеси та виявляючи закономірності в масивах даних, DL може впорядкувати операції та сприяти прийняттю більш обґрунтованих рішень [9].

Модель DL призначена для імітації функціональності людського мозку і складається з декількох шарів штучних нейронів, які здатні автономно розпізнавати закономірності в масивах даних. Послідовні шари моделі обробляють і передають інформацію наступному шару, таким чином поступово визначаючи більш абстрактні ознаки. Такий підхід дозволяє моделі вирішувати складні завдання, включаючи розпізнавання зображень, тексту та мови. На рисунку 3 представлено архітектуру роботи моделі DL для обробки зображень публічних профілів кандидатів професійних мереж.

Адаптація роботи алгоритму для аналізу резюме кандидатів із врахуванням останніх результатів досліджень в сфері фізіогноміки дозволить врахувати якості особистості кандидатів в процесі аналізу їх відповідності вимогам до наявних вакансій. Кадровий профайлінг, як один із видів соціального профайлінгу, окрім встановлення відповідності особистісних якостей кандидатів функціональним вимогам посади, дозволяє виявити для подальшого аналізу ризиків з боку кандидатів і співробітників [19].

Обробка природної мови (NLP) є високоефективним інструментом для аналізу текстових даних у сфері HRM. NLP автоматизує обробку та аналіз різноманітних текстових даних, включаючи резюме, посадові інструкції та пости в соціальних мережах. Це дозволяє визначити найбільш релевантних кандидатів і компаній, з якими варто організовувати взаємодію.

Одне з основних застосувань NLP – аналіз резюме. Системи на основі NLP здатні витягувати релевантну інформацію, таку як навички та досвід, і автоматично оцінювати, чи відповідають кандидати необхідним критеріям для відповідної посади. Це підвищує ймовірність успішного найму, оскільки система здатна рекомендувати кандидатів, чий досвід відповідає заданим критеріям [20].

Модель NLP аналізує, розуміє і генерує текстові дані, використовуючи в основі методи машинного і DL для обробки людської мови. Дана модель обробки перетворює текст на числові вектори, які відображають значення слів та їхній контекст. На основі цього модель може передбачати, які слова будуть використані далі, аналізувати настрої, відповідати на запитання та виконувати інші завдання, пов'язані з мовою. Модель навчається на великих обсягах тексту, щоб розпізнавати закономірності в мовних даних і виконувати різні мовні завдання. На рисунку 4 представлено вигляд архітектури моделі NLP.

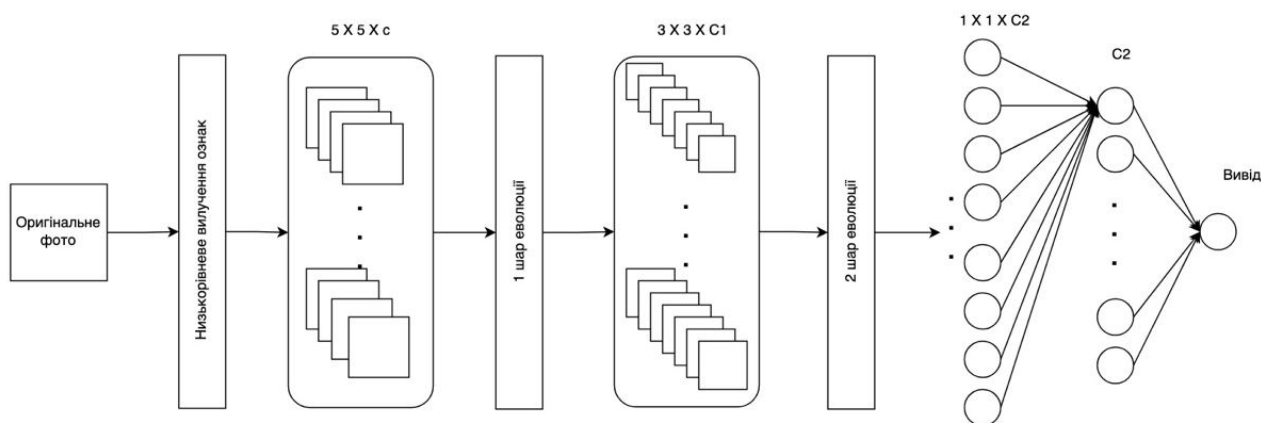


Рис. 3 – Архітектура роботи моделі Deep Learning [21]

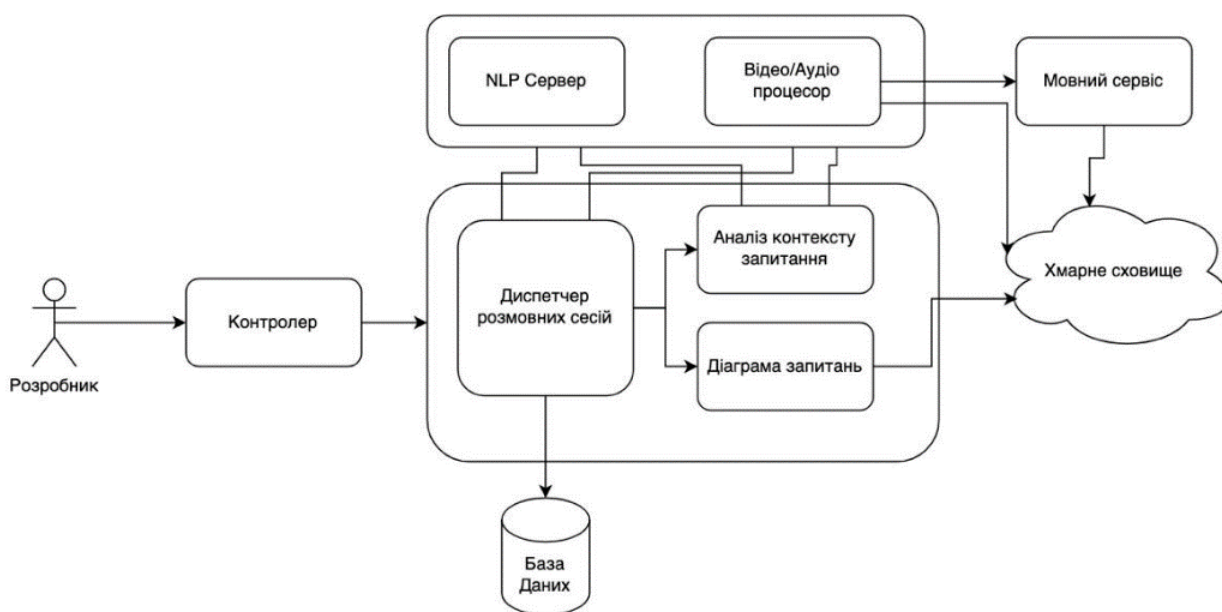


Рис. 4 – Вигляд архітектури моделі Natural Language Processing [22]

Результати порівняльного аналізу представлених технологій в аспекті впровадження в сфері HRM подано в вигляді таблиці методів та алгоритмів (табл. 1).

Варто також зазначити, що для аналізу даних з використанням статистичних даних доступна мова програмування R. Для обробки великих масивів даних доцільно використовувати Scala (Apache Spark) через можливість аналізу даних у режимі реального часу. Проте, в більш широкому контексті завдання дослідження, перевагу слід віддати використанню мови програмування Python, враховуючи її придатність для

обробки даних, автоматизації та машинного навчання [23].

Для вирішення цієї задачі рекомендується використовувати Google Cloud Functions або Azure Functions, оскільки обидві платформи пропонують гнучку інтеграцію з іншими хмарними сервісами. Google Cloud Functions особливо добре підходить для обробки великих обсягів даних, завдяки інтеграції з BigQuery та Google Cloud Storage. Azure Functions пропонує більш плавну інтеграцію з існуючою інфраструктурою Microsoft, тим самим задовольняючи бажані вимоги з точки зору автоматизації процесів [24].

Таблиця 1

Порівняльна таблиця методів та алгоритмів

Технологія	Generative AI	Deep Learning	NLP
Точність	Достатня для генерації тексту та персоналізованих відповідей	Висока для класифікації, прогнозування та виявлення складних патернів	Достатня для обробки тексту, аналізу тональності текстів та обробки смислової інформації
Масштабованість	Обробка великого обсягу даних з великою швидкістю	Підходить для великих наборів даних, але потребує великих потужностей	Може аналізувати великі обсяги тексту
Можливості для інтеграції	Легка інтеграція з соціальними мережами та CRM системами	Легка інтеграція з великими наборами даних (структуровані або напівструктуровані)	Підходить для текстових, напівструктурованих даних (резюме, соціальні мережі, вакансії)
Ефективність обчислювальних ресурсів	Вимагає обчислювальних ресурсів для навчання, але не потребує багато ресурсів під час генерації	Висока потреба в ресурсах під час навчання великих моделей	Відносно низька потреба в ресурсах, ефективно використання обчислювальних ресурсів для аналітики
Застосування	Генерація відповідей, підбір тексту для маркетингових повідомлень	Процес розподілу кандидатів за категоріями, прогнозування результатів на основі історичних даних та сегментація клієнтів є важливими складовими процесу управління кандидатами.	Комплексний аналіз текстових даних, включаючи резюме, оголошення про вакансії та контент соціальних мереж.
Недоліки	Ризик генерації некоректних або недоречних відповідей	Високі вимоги до ресурсів та даних, складність представлення інформації	Обмеження при роботі з даними, які не мають текстової структури

Мета статті

Метою дослідження є розроблення інформаційної технології підтримки прийняття рішень в управлінні людськими ресурсами з подальшою її реалізацією у вигляді віртуального асистента. Аналіз сучасного стану розвитку інформаційних технологій в сфері управління ресурсами акцентує увагу авторів на поєднанні декількох технологій з метою використання переваг від інтеграції, що є найбільш ефективним підходом до вирішення завдань дослідження.

Виклад основного матеріалу

Віртуальні асистенти представляють собою програмні системи на основі AI для виконання завдань, що зазвичай виконуються людьми. Ці системи здатні взаємодіяти з користувачами через текстовий або голосовий інтерфейс, виконуючи такі функції, як планування зустрічей, надання інформації, виконання запитів, управління кореспонденцією або виконання рутинних завдань. Ці віртуальні асистенти використовуються як у бізнесі, так і в повсякденному житті, а їхніми основними функціями є автоматизація процесів, зменшення навантаження на працівників і підвищення ефективності робочого процесу. Їх інтеграція в різноманітні

платформи, включаючи мобільні додатки, CRM-системи та корпоративні інструменти, прискорює виконання завдань і покращує комунікацію в організації.

Асистент на основі генеративного AI функціонує за чітко визначеним алгоритмом, реалізуючи базові задачі пошуку, комунікації і попереднього відбору кандидатів. Схематично місце і роль віртуального асистента рекрутера в процесі найму персоналу проілюстровано на рисунку 5. Віртуальний асистент залучається до процесу рекрутингу на етапі пошуку і підбору кандидатів, який є комплексним і складається з ряду задач. Після першої активації асистент отримує завдання знайти кандидатів, які відповідають вимогам конкретної вакансії. Для виконання цього етапу мають бути виконані такі задачі, як реєстрація на платформі професійної соціальної мережі, аналізі профілів акаунтів, визначення потенційних кандидатів відповідно вимогам до вакансій.

Під час цього аналізу асистент враховує такі ключові параметри, як навички, публікації, фотографії та загальний стиль профілю. Використовуючи зібрані дані, асистент формує уточнену вибірку потенційних кандидатів, які найбільше відповідають вимогам вакансії.

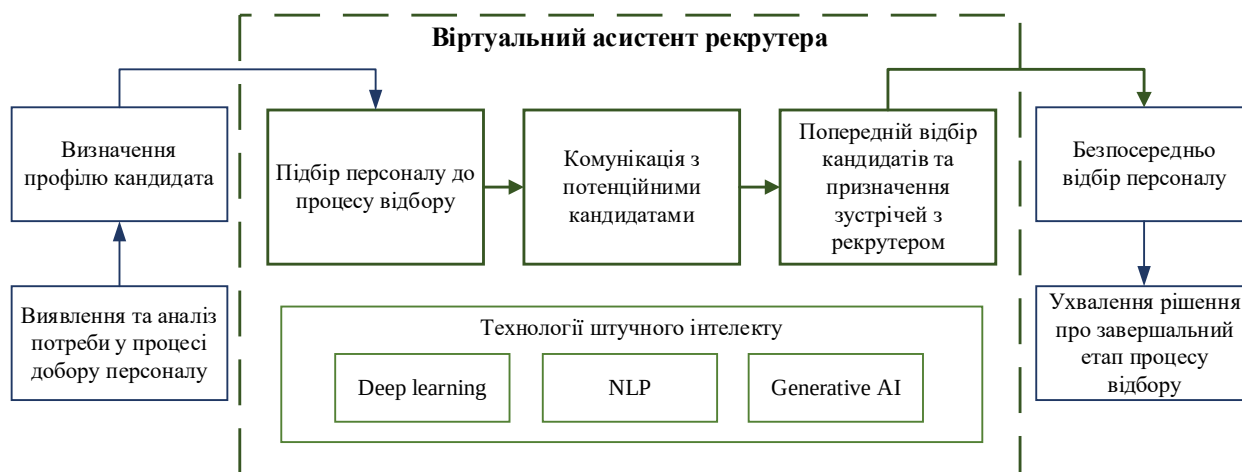


Рис. 5 – Роль віртуального асистента в процесі найму персоналу

Відібраним кандидатам автоматично надсилаються персоналізовані електронні листи з пропозицією взяти участь у процесі відбору. Асистент також підтримує подальшу комунікацію в разі отримання позитивної відповіді на пропозицію. В разі успішного діалогу асистент проводить попередню співбесіду та, за потреби, призначає зустріч з представником зацікавленої компанії, інтегруючи її в календар. На цьому етапі роль асистента завершується, і відповідальність переходить до HR-фахівця компанії, який проводить більш детальну співбесіду та рекомендує чи ні кандидата для проходження завершального етапу відбору.

Інтеграція технологій генеративного AI, DL та NLP дозволяє вирішувати складні завдання у сфері HRM та рекрутингу, забезпечуючи оптимальну ефективність та автоматизацію процесів. Поєднання цих технологій дозволяє управляти значними обсягами даних, покращує комунікацію з кандидатами та клієнтами, а також полегшує прийняття рішень на основі всебічного аналізу.

Висновки

Метою дослідження було розроблення інформаційної технології підтримки прийняття рішень в управлінні людськими ресурсами з подальшою її реалізацією у вигляді віртуального асистента. Аналіз сучасного стану розвитку інформаційних технологій в сфері управління ресурсами акцентує увагу авторів на поєднанні декількох технологій з метою використання переваг від інтеграції, що є найбільш ефективним підходом до вирішення завдань дослідження.

Поєднання генеративного AI та NLP дозволить автоматизувати комунікацію з потенційними кандидатами шляхом створення персоналізованих повідомлень для кандидатів, які відповідатимуть конкретному резюме або профілю кандидата.

Від поєднання алгоритмів DL та NLP можна отримати більш високу якість аналізу великих обсягів текстових даних, включаючи резюме, оголошення про

вакансії та зміст публічних профілів в соціальних мережах. Такий підхід полегшить ідентифікацію найбільш релевантних кандидатів. Оскільки DL дозволяє будувати моделі, які можуть передбачати майбутні результати, виявляючи та аналізуючи неочевидні закономірності в масивах даних. Це призводить до підвищення ефективності відбору кандидатів.

Нарешті, поєднання генеративного AI та DL дозволить не лише аналізувати дані, але й генерувати відповіді на їх основі. Це ефективне рішення для персоналізації рекомендацій у сфері управління персоналом. Однією із задач може бути аналіз історичних даних про працівників для формування пропозиції потенційних кар'єрних.

З огляду на запропоновані комбінації алгоритмів звужений вибір засобів реалізації останніх при розробці рішень для підтримки прийняття рішень в сфері управління персоналом. Мова програмування Python дозволить реалізувати складні алгоритми для обробки та аналізу даних, тим самим сприяючи автоматизації HR-процесів. Масштабованість і гнучкість AWS Lambda полегшить обробку великих обсягів інформації, впроваджуючи ефективні рішення без необхідності управління серверами. Інтеграція OpenAI полегшує використання генеративних моделей, що дозволить генерувати персоналізовані рекомендації та автоматизувати комунікацію з кандидатами.

Реалізація комплексного аналізу великих наборів як структурованих, так і неструктурованих (текстових) даних, включаючи резюме, коментарі в соціальних мережах та інших джерелах, сприятиме більш швидкому і точному визначенню найбільш підходящих кандидатів. Поєднання розглянутих технологій в інформаційній технології підтримки прийняття рішень в сфері управління персоналом забезпечить високу точність, швидкість і якість бізнес-процесів за рахунок не лише автоматизації останніх, а й поглибленої персоналізації взаємодії, що є вирішальним фактором успіху в сучасному бізнес-середовищі.

Перелік використаних джерел

- [1] Юрченко Г.М., Захарченко Р.В., Лесьо А.П. Цифрові трансформації в управлінні людським капіталом. *Інвестиції: практика та досвід*. 2024. № 12. С. 172-177. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.12.172>.
- [2] Artificial intelligence and a new era of human resources. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/ai-in-hr> (дата звернення: 10.10.24).
- [3] Зайченко О.І., Кузнецова В.І. Управління людськими ресурсами: навчальний посібник; за наук. ред. О. І. Зайченко. Івано-Франківськ: «Лілея-НВ», 2015. 232 с.
- [4] Priya Dr. Role of Artificial Intelligence in Human Resources Management. *15th International Conference on Business and Information*, Wattala, Sri Lanka, 1-2 November 2024. Vol. 15. Pp. 158-164.
- [5] Лозко С. Як українські HR-фахівці використовують у своїй роботі технології штучного інтелекту? URL: <https://budni.robota.ua/hr/yak-ukrayinski-hr-fahivtsi-vikoristovuyut-u-svoyiy-roboti-tehnologiyi-shtuchnogo-intelektu-doslidzhennya-robota-ua> (дата звернення: 24.12.2024).
- [6] Hewage A. Exploring the Applicability of Artificial Intelligence in Recruitment and Selection Processes: A Focus on the Recruitment Phase. *Journal of Human Resource and Sustainability Studies*. 2023. Vol. 11. Pp. 603-634. DOI: <https://doi.org/10.4236/jhrss.2023.113034>.
- [7] Орехов Д. Застосування штучного інтелекту в управлінні сучасним підприємством. *Економіка і суспільство*. 2024. Вип. 64. С. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-143>.
- [8] Піддубна Л.І., Чуєва І.С. Міжнародний досвід використання цифрових технологій в управлінні персоналом ІТ-компаній. *Економіка і суспільство*. 2023. Вип. 55. С. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-98>.
- [9] Федчун Н.О., Аркуша Л.І. Основи профайлінгу: навчально-методичний посібник. Одеса : Юридична література, 2023. 56 с. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.26852>.
- [10] AI in Recruiting 2024: Pros and Cons. URL: <https://www.kornferry.com/insights/featured-topics/talent-recruitment/ai-in-recruiting-navigating-trends-for-2024> (дата звернення: 11.10.24)
- [11] Exploring the application of generative AI in human resource management / P. Kumah, I.K. Nketia, W. Yaokumah, K.O. Asante-Offei. *Generative AI for Transformational Management*. 2024. Pp. 51-82. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5578-7.ch003>.
- [12] Gundapu S., Mamidi R. Transformer based Automatic COVID-19 Fake News Detection System. 2021. arXiv:2101.00180v3. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.00180>.
- [13] Azure OpenAI Service documentation. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/ai-services/openai/> (дата звернення: 12.10.24)
- [14] 10 Things You Need to Know About BERT and the Transformer Architecture That Are Reshaping the AI Landscape. URL: <https://neptune.ai/blog/bert-and-the-transformer-architecture> (дата звернення: 12.10.24)
- [15] Raman R., Venugopalan M., Kamal A. Evaluating human resources management literacy: A performance analysis of ChatGPT and Bard. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. e27026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27026>.
- [16] How to use ChatGPT in Recruitment [12 sample use cases]. URL: <https://www.occupop.com/blog/how-to-use-chatgpt-in-recruitment-10-sample-use-cases> (дата звернення: 12.10.24)
- [17] Idrees H. GPT vs. BERT: Unveiling the Titans of Natural Language Processing. URL: <https://medium.com/@hassaanidrees7/gpt-vs-bert-unveiling-the-titans-of-natural-language-processing-6536c787d32d> (дата звернення: 13.10.24)
- [18] Horodyski P. Recruiter's perception of artificial intelligence (AI)-based tools in recruitment. *Computers in Human Behavior Reports*. 2023. Vol. 10. Article 100298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100298>.
- [19] Руль Ю.В., Мартинова Т.О. Психологія профайлінгу : навч. посіб. К. : ДП Вид. дім «Персонал», 2018. 236 с.
- [20] NLP Tools for Recruitment: Understanding Candidate Language. URL: <https://www.herohunt.ai/blog/nlp-tools-for-recruitment> (дата звернення: 15.10.24)
- [21] Black J., van Esch P. AI-enabled recruiting: What is it and how should a manager use it? *Business Horizons*. 2020. Vol. 63, iss. 2. Pp. 215-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.12.001>.
- [22] Sadriu S. Technological Trends on Cognitive Virtual Assistants. *Proceedings of the 9-th International Conference on Computer Science and Communication Engineering*, Prishtinë, Kosovo, 2020.
- [23] Why Use Python for AI and Machine Learning. Waverley Software. URL: <https://waverleysoftware.com/blog/python-for-ai-and-ml/> (дата звернення: 16.10.24)
- [24] Azure Functions documentation. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-functions/> (дата звернення: 16.10.24)

THE STATE OF DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY DECISION-MAKING SUPPORT IN MAN-AGEMENT HUMAN RESOURCES

Nenya A.	PhD (Engineering), associate professor, Sumy State University, Sumy, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2003-3531 , e-mail: a.nenia@itp.sumdu.edu.ua ;
Nesterov O.	postgraduate student, Sumy State University, Sumy;
Buznik O.	student, Sumy State University, Sumy, e-mail: oleksandr.buznik@student.sumdu.edu.ua

The research is related to the development of information technologies designed to improve the efficiency and effectiveness of decision-making processes in the field of human resource management. Effective human resource management is a critical aspect of modern organisations, as it plays a key role in determining their competitiveness and long-term success. The emergence of big data has challenged HR professionals to effectively navigate through huge amounts of information. This information includes data sourcing, selection, communication and interaction with candidates and employees. The integration of information technology into human resource management processes has the potential to automate routine business tasks and simplify decision-making processes, especially when these decisions are based on conclusions drawn from the analysis of a complex set of data from various sources. The article presents a comprehensive overview of methods of applying modern artificial intelligence algorithms to analyse structured and unstructured data that are typical for human resource management. The article explores the potential of generative models of artificial intelligence (GPT and BERT), deep learning and natural language processing for decision support. The article considers the possibility of integrating personal qualities of candidates into the assessment of their suitability for vacant positions by applying deep learning methods. The authors propose to use a combination of ap-approaches in the development of information technologies to achieve greater automation of the processes of candidate selection, resume analysis, communication with candidates and personalisation of interaction.

Keywords: human resource management, GPT, Deep Learning, NLP, decision support, big data analysis, virtual assistant.

References

- [1] H. Yurchenko, R. Zakharchenko, and A. Lyesjo, «Tsyfrovi transformatsii v upravlinni liudskym kapitalom» [«Digital transformation in human capital management»], *Investytsiyi: praktyka ta dosvid*, № 12, pp. 172-177, 2024. doi: 10.32702/2306-6814.2024.12.172. (Ukr.)
- [2] Artificial intelligence and a new era of human resources. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/ai-in-hr>. Accessed on: October 10, 2024.
- [3] O.I. Zaichenko, and V.I. Kuznetsova, *Upravlinnia liudskymy resursamy: navchalnyi posibnyk* [Human Resource Management: A Study Guide], O.I. Zaichenko, Ed. Ivano-Frankivsk, Ukraine: «Lileia-NV» Publ., 2015. (Ukr.)
- [4] Dr. Priya, «Role of Artificial Intelligence in Human Resources Management», in *Proc. of the 15th International Conference on Business and Information*, Wat-tala, Sri Lanka, 2024, vol. 15, pp. 158-164.
- [5] S. Lozko, Yak ukrainski HR-fakhivtsi vykorystovuiut u svoii roboti tekhnolohii shtuchnoho intelektu? (How do Ukrainian HR specialists use artificial intelligence technologies in their work?) [Online]. Available: <https://budni.robota.ua/hr/yak-ukrayinski-hr-fahivtsi-vikoristovuyut-u-svoyiy-roboti-tehnologiyi-shtuchnogo-intelektu-doslidzhennya-robota-ua>. Accessed on: December 24, 2024.
- [6] A. Hewage, «Exploring the Applicability of Artificial Intelligence in Recruitment and Selection Processes: A Focus on the Recruitment Phase», *Journal of Human Resource and Sustainability Studies*, vol. 11, pp. 603-634, 2023. doi: 10.4236/jhrss.2023.113034.
- [7] D. Oriekhov, «Zastosuvannia shtuchnoho intelektu v upravlinni suchasnym pidpriemstvom» [«Usage of artificial intelligence in management of modern enterprise»], *Ekonomika i suspilstvo – Economy and Society*, vol. 64, pp. 1-9, 2024. doi: 10.32782/2524-0072/2024-64-143.
- [8] L. Piddubna, and I. Chuieva, «Mizhnarodnyi dosvid vykorystannia tsyfrovyykh tekhnolohii v upravlinni personalom IT-kompanii» [«International experience in the use of digital technologies in the hr management of it companies»], *Ekonomika i suspilstvo – Economy and Society*, vol. 55, pp. 1-7, 2023. doi: 10.32782/2524-0072/2023-55-98.
- [9] N.O. Fedchun, and L.I. Arkusha, *Osnovy profailinhu: navchalno-metodychnyi posibnyk* [Profiling Basics: A Training Manual]. Odesa, Ukraine: Yurydychna literatura Publ., 2023. doi: 10.32837/11300.26852. (Ukr.)
- [10] AI in Recruiting 2024: Pros and Cons. [Online]. Available: <https://www.kornferry.com/insights/featured-topics/talent-recruitment/ai-in-recruiting-navigating-trends-for-2024>. Accessed on: October 11, 2024.
- [11] P. Kumah, I.K. Nketia, W. Yaokumah, and K.O. Asante-Offei, «Exploring the application of generative AI in human resource management», in *Generative AI for Transformational Management*, 2024, pp. 51-82. doi: 10.4018/979-8-3693-5578-7.ch003.

- [12] S. Gundapu, and R. Mamidi, «Transformer based Automatic COVID-19 Fake News Detection System», 2021, *arXiv:2101.00180v3*. doi: **10.48550/arXiv.2101.00180**.
- [13] Azure OpenAI Service documentation. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/ai-services/openai/>. Accessed on: October 12, 2024.
- [14] 10 Things You Need to Know About BERT and the Transformer Architecture That Are Reshaping the AI Landscape. [Online]. Available: <https://nep-tune.ai/blog/bert-and-the-transformer-architecture>. Accessed on: October 12, 2024.
- [15] R. Raman, M. Venugopalan, and A. Kamal, «Evaluating human resources management literacy: A performance analysis of ChatGPT and Bard», *Heliyon*, vol. 10, no. e27026, 2024. doi: **10.1016/j.heliyon.2024.e27026**.
- [16] How to use ChatGPT in Recruitment [12 sample use cases]. [Online]. Available: <https://www.occupop.com/blog/how-to-use-chatgpt-in-recruitment-10-sample-use-cases>. Accessed on: October 12, 2024.
- [17] Idrees H. GPT vs. BERT: Unveiling the Titans of Natural Language Processing. [Online]. Available: <https://medium.com/@hassaanidrees7/gpt-vs-bert-unveiling-the-titans-of-natural-language-processing-6536c787d32d>. Accessed on: October 13, 2024.
- [18] P. Horodyski, «Recruiter's perception of artificial intelligence (AI)-based tools in recruitment», *Computers in Human Behavior Reports*, vol. 10, article 100298, 2023. doi: **10.1016/j.chbr.2023.100298**.
- [19] Yu.V. Rul, and T.O. Martynova, *Psykhologhiia profail-inhu : navch. posib.* [Psychology of profiling: A Training Manual]. Kyiv, Ukraine: DP «Personal» Publ., 2018. (Ukr.)
- [20] NLP Tools for Recruitment: Understanding Candidate Language. [Online]. Available: <https://www.hero-hunt.ai/blog/nlp-tools-for-recruitment>. Accessed on: October 15, 2024.
- [21] J. Black, and P. van Esch, «AI-enabled recruiting: What is it and how should a manager use it?», *Business Horizons*, vol. 63, iss. 2, pp. 215-226, 2020. doi: **10.1016/j.bushor.2019.12.001**.
- [22] S. Sadriu, «Technological Trends on Cognitive Virtual Assistants», in Proceedings of the 9-th International Conference on Computer Science and Communication Engineering, Prishtinë, Kosovo, 2020.
- [23] Why Use Python for AI and Machine Learning. Waverley Software. [Online]. Available: <https://waverleysoftware.com/blog/python-for-ai-and-ml/>. Accessed on: October 16, 2024.
- [24] Azure Functions documentation. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-functions/>. Accessed on: October 16, 2024.

Стаття надійшла 04.02.2025

Стаття прийнята 13.03.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Неня А.В., Нестеров О.О., Бузнік О.О. Стан розвитку інформаційних технологій підтримки прийняття рішення в управлінні людськими ресурсами. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 50. С. 40-49. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336253>.

УДК 004.65:004.45

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336268

ПРИКЛАДИ ПРОЕКТУВАННЯ ДОКУМЕНТООРІЄНТОВАНОЇ БАЗИ ДАНИХ В MONGODB

- Єлфімов Д.С. бакалавр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: yelfimov_d_s@students.pstu.edu;
- Воротнікова З.Є. канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-5981>, e-mail: vorotnikova_z_j@pstu.edu

У статті детально досліджуються особливості та переваги використання документно-орієнтованих баз даних (NoSQL) як сучасної альтернативи традиційним реляційним системам управління даними. У контексті швидкого розвитку сучасної цифрової економіки та зростаючої необхідності у гнучких, масштабованих і високопродуктивних рішеннях, автори аналізують можливості застосування NoSQL баз даних у різних сферах діяльності. Це зокрема включає веб- та мобільні додатки, системи управління контентом, інтернет-магазини та інші сфери, де швидкість та масштабованість є критичними факторами. Проведено глибокий порівняльний аналіз реляційних та документноорієнтованих моделей зберігання даних, щоб показати їхні ключові відмінності та переваги. Для кожної моделі наведені приклади практичного застосування та особливості, що визначають їхню відповідність різним задачам. Особливу увагу приділено прикладам проектування та реалізації баз даних для конкретних платформ, таких як блог-платформи та інтернет-магазини, з використанням MongoDB. У цих прикладах підкреслюється гнучкість структури даних, висока швидкість доступу до інформації та можливість масштабування у відповідь на зростаючий обсяг користувацьких запитів. Автори аналізують переваги кожної моделі, а також обговорюють її обмеження, підкреслюючи важливість правильного підходу до вибору архітектури бази даних залежно від характеру та вимог конкретної задачі. Загалом, стаття має на меті популяризацію сучасних технологій зберігання даних і підкреслює актуальність дослідження та впровадження NoSQL баз даних для підвищення ефективності, гнучкості та адаптивності інформаційних систем у сучасну епоху цифрових технологій. Вона сприяє розумінню того, як правильний вибір архітектури бази даних може позитивно вплинути на швидкість розробки, масштабованість та довгострокову стабільність інформаційних систем.

Ключові слова: СКБД, RDBMS, NOSQL, JSON, JOIN, MongoDB, документноорієнтовані бази даних, блог-платформа, інтернет-магазин.

Постановка проблеми

Для забезпечення конкурентоспроможності в сучасній цифровій економіці, орієнтованій на досвід користувача, підприємства змушені швидко впроваджувати інноваційні рішення, пов'язані з розробкою веб-, мобільних та IoT-додатків [1, 2]. Такий підхід вимагає прискорення процесів розробки та підвищення їхньої гнучкості, оскільки нові системи розвиваються значно швидше за старіючі традиційні рішення, такі як ERP. У цьому контексті реляційні бази даних виявляються обмеженими через свою фіксовану модель даних, що перешкоджає гнучкій адаптації. В якості альтернативи, бази даних типу NoSQL (Not Only SQL) дозволяють бізнесу простіше розробляти і масштабувати системи, забезпечуючи високу продуктивність і доступність, що особливо важливо в умовах динамічної цифрової економіки.

Безліч організацій вже використовують технології NoSQL, що спочатку застосовувалися для кешування або малих проектів, бази NoSQL поступово інтегрувалися в ключові програми і сьогодні виступають у ролі основи для розробки програмного забезпечення.

Вибір типу бази даних є важливим етапом в проектуванні інформаційних систем. Від нього залежить ефективність доступу до даних, масштабованість і безпека. Неправильний вибір може призвести до

ускладнень, підвищених витрат на підтримку та погіршення користувацького досвіду.

Реляційні бази даних широко застосовуються в сценаріях зі стабільною структурою даних і з високими вимогами щодо зв'язків, наприклад, в системах управління клієнтськими даними (CRM), фінансових додатках та системах обліку, де важлива чітка організація інформації про клієнтів, замовлення та продукти, а також виконання складних аналітичних запитів. У той же час, нереляційні бази даних ефективні в проектах з динамічними вимогами та великими обсягами даних, таких як веб-додатки, системи управління вмістом, соціальні мережі та хмарні сервіси, де структура даних має бути гнучкою та адаптованою до змін [2, 3].

Технологія NoSQL дозволяє зберігати дані у форматі документів JSON, що забезпечує гнучкість та масштабованість, а також підвищує швидкість реагування на потреби сучасного бізнесу. Термін «NoSQL» не означає відмову від SQL, а підкреслює можливість роботи з даними без використання традиційної мови запитів SQL, а також поєднання гнучкості формату JSON з потужністю SQL для поєднання переваг обох технологій.

Вивчення, популяризація та впровадження технологій NoSQL є актуальними завданнями підвищення ефективності розробки та експлуатації сучасних інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

NoSQL бази даних використовуються для високонавантажених, розподілених та динамічних систем, де важлива гнучкість та швидкість. Розуміння специфіки кожної технології допомагає вибрати оптимальне рішення для різних програм.

До типів баз даних NoSQL належать документоорієнтовані БД (MongoDB, CouchDB, Couchbase, RavenDB, MarkLogic, ArangoDB, Elasticsearch), БД типу «ключ – значення» (Redis, Riak, Amazon DynamoDB, Aerospike, LevelDB, RocksDB, Berkeley DB, Memcached), колонкові БД (ClickHouse, Apache Cassandra, Amazon Redshift, Google BigQuery, Vertica, ClickHouse, Druid, MonetDB, Kdb+), часові БД (TimescaleDB, InfluxDB, OpenTSDB, Prometheus, KDB+/q, VictoriaMetrics, Graphite, QuestDB) та графові БД (Neo4j, JanusGraph, Amazon Neptune, OrientDB, TigerGraph, Blazegraph, Virtuoso, SAP HANA Graph). У статті [3] пропонується широкий огляд та класифікація статей на основі різних факторів, таких як мотиви зберігання великих даних, методи NoSQL, що використовуються для зберігання великих даних, та значущі системи великих даних у різних галузях.

Бази даних веб-сайтів та інтернет-магазинів були одними з перших, що перейшли на NoSQL-структуру. Це пов'язано з необхідністю масштабування та обробки великих обсягів неструктурованих даних, притаманних таким додаткам. Зокрема, платформи Amazon Dynamo (2007) та Cassandra (відкритий вихідний код Facebook, 2008) стали знаковими прикладами використання NoSQL у цьому контексті [4].

Проведені в статті [5] дослідження публікацій за останні 10 років показали, що документоорієнтовані та графові бази даних, особливо MongoDB, Cassandra та Neo4j, є найбільш вивченими, а підхід до навчання на основі проектів є найпоширенішим методом навчання.

У базах даних типу «ключ-значення» дані представлені у вигляді пар: унікальний ключ і пов'язане з ним значення. Як ключі, так і значення можуть бути будь-якими об'єктами – як простими, так і складними. Бази даних, орієнтовані на документи, також використовують пари «ключ-значення», але ключами можуть бути лише рядки, а значеннями – документи, закодовані у форматах типу JSON або XML, а також можуть включати PDF-файли, зображення або текстові файли. Це особливо зручно для роботи зі складними та ієрархічними структурами, де кожен документ може мати унікальні поля та вкладені дані. Вони широко застосовуються в системах управління контентом, мультимедійних платформах, зберіганні та аналізі великих обсягів напівструктурованих даних, а також у системах корпоративних знань та документації [3].

У статті [6] досліджується можливість документоорієнтованої бази даних з організації вихідних даних безпілотних літальних апаратів, таких як зображення та хмари точок. Документоорієнтованій структурі бази даних віддано перевагу порівняно з реляційною,

оскільки вони здатні обробляти петабайти даних складної структури.

Порівняльна оцінка придатності реляційних баз даних (RDBMS) та документоорієнтованих баз даних (NoSQL) для додатків FinTech проводиться у статті [7]. Аналізуючи ключові показники, такі як продуктивність, масштабованість, узгодженість даних та експлуатаційна ефективність, це дослідження дає дієві відомості про сильні сторони та недоліки кожної архітектури бази даних. Дослідження оцінює реальні сценарії у контексті FinTech, включаючи управління транзакціями, зберігання даних клієнтів та аналітику.

У статті [8] розглядаються три підходи до адаптації багатовимірної моделі сховища історичних даних до Документоорієнтованих структур даних. Зазвичай історичні дані є таблицями фактів, оточені розмірними таблицями. Традиційно такі сховища підтримуються, переважно, реляційними базами даних.

Ряд статей [9, 10] присвячені автоматичним методам перетворення структур даних та міграції даних між реляційними та документоорієнтованими моделями зберігання даних.

У сучасному цифровому середовищі швидкий розвиток веб- та мобільних додатків, систем IoT і хмарних сервісів ставить під сумнів ефективність традиційних реляційних баз даних, оскільки вони не завжди здатні забезпечити необхідну гнучкість, масштабованість і продуктивність для динамічних і об'ємних даних. Водночас, технології NoSQL, зокрема документоорієнтовані бази даних, набувають все більшої популярності у сфері розробки сучасних інформаційних систем. Вивчення та порівняльний аналіз цих технологій має важливе практичне значення для оптимізації архітектури програмних продуктів, підвищення їхньої ефективності та адаптивності до швидкозмінних вимог ринку.

Мета статті

Метою роботи є дослідження особливостей та переваг документоорієнтованих систем керування базами даних (СКБД) у контексті їх застосування для сучасних веб- та мобільних додатків, а також порівняльна оцінка з традиційними реляційними базами даних. Важливою ціллю є також ілюстрація процесу переходу від реляційної до документоорієнтованої моделі на прикладах реальних сценаріїв, таких як блог-платформа та інтернет-магазин, з метою демонстрації переваг і особливостей кожного підходу.

В рамках дослідження передбачено аналіз сучасних типів NoSQL баз даних, їх структурних особливостей, можливостей та обмежень; порівняльне вивчення моделей даних (реляційної та документної); розробку прикладів проектування баз даних для популярних сценаріїв; а також оцінку впливу вибору типу бази даних на продуктивність, масштабованість і зручність управління даними у реальних системах.

Виклад основного матеріалу

Для ілюстрації процесу проектування нереляційної бази даних було обрано дві поширені задачі, база даних для яких історично будувалася як реляційна: «блог» та «інтернет-магазин». Для розробки структури даних було обрано документоорієнтовану структуру [5].

Документоорієнтовані бази даних є системами зберігання даних, у яких кожен елемент – це структурований документ, що містить набір пар ключ-значення. Ці документи можуть бути записані у форматах, таких як JSON, BSON, XML та аналогічних, та групуються в колекції, забезпечуючи ефективну організацію та взаємозв'язок даних. На відміну від реляційних баз даних, де структура записів суворо фіксована, у документоорієнтованих системах відсутня схема даних, що дозволяє динамічно змінювати структуру окремих документів без необхідності глобальної модифікації бази. Кожному документу надається унікальний ідентифікатор, зазвичай рядкового типу, що забезпечує швидкий доступ та міждокументні посилання.

Однією з суттєвих переваг документоорієнтованої БД є гнучкість, що дозволяє легко додавати нові атрибути та розширювати структуру даних, а також масштабованість за рахунок горизонтального розподілу навантаження. Документні бази даних забезпечені потужним засобами індексації та складних запитів, що сприяє високій продуктивності при пошуку та фільтрації даних, а також підтримують багатомовні та

мультимедійні сценарії за рахунок можливості зберігання різних локалізацій та медіа-даних усередині документів.

Однак документоорієнтовані моделі мають і обмеження: складності при реалізації міждокументних запитів, ризик надмірності даних та неефективність при роботі зі складними взаємозв'язками чи транзакціями.

Практичне застосування документних баз даних широко поширене в сферах управління контентом, каталогізації та інтернету речей (IoT). У системах керування контентом такі бази дозволяють легко вносити зміни та оновлювати окремі документи без переривання роботи системи. У каталогах, наприклад, для інтернет-комерції, вони забезпечують ефективне зберігання товарів із різноманітними атрибутами, де зміни окремих елементів не торкаються інших. В IoT-проектах вони дозволяють оперативно зберігати потокові дані з датчиків, не вимагаючи попередньої схеми та забезпечуючи масштабованість для обробки великих обсягів інформації.

До популярних систем цього типу відносяться MongoDB, CouchDB, Firebase Firestore та Amazon DocumentDB.

Для реалізації прикладів документоорієнтованої бази даних для завдань «блог» та «інтернет-магазин» була обрана СУБД MangoDB як найпопулярніша і найпростіша в освоєнні СУБД для документоорієнтованої бази даних [5].

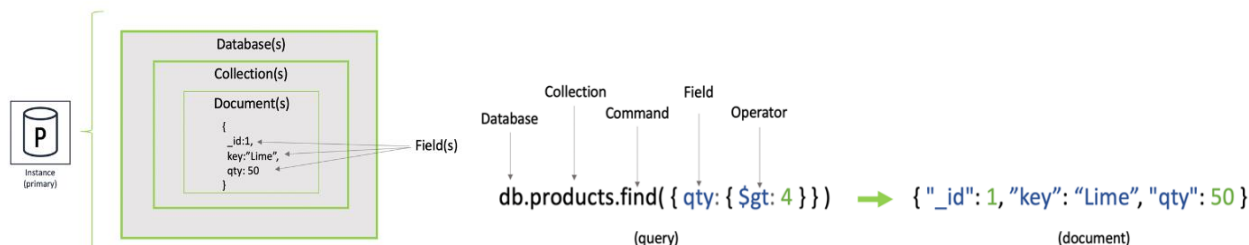


Рис. 1 – Структура документоорієнтованої бази даних

Таблиця 1

Порівняння реляційної та документної баз даних

РСКДБ	Система документних баз даних
Побудовано коло концепції про зв'язки	Зосереджена на даних, а не на зв'язках
Структурує данні в кортежі (строки)	Замість строк в документах є різноманітні характеристики
Визначає данні (утворює зв'язки) через обмеження та зовнішні ключі (залежна таблиця посиляється на головну через її ідентифікатор)	Замість зовнішніх ключів зв'язки реалізовано через вкладені данні (в один документ може бути вложено інші документи, що формує зв'язок)
Для утворення зв'язків використовує мову DDL	Не потребує мови DDL для утворення зв'язків
Забезпечує виключну узгодженість даних. У певних випадках її конче необхідно (наприклад, щоденні банківські операції)	Забезпечує узгодженість у підсумку (з періодом неузгодженості)

Приклад 1. Блог-платформа

Блог-платформа – призначена для створення, публікації, перегляду та управління контентом у форматі блогу. Вона дозволяє авторам писати статті (пости), категоризувати їх, додавати теги, а читачам – переглядати ці статті, залишати коментарі та взаємодіяти з платформою. База даних використовується для наступних дій:

1. Зберігання контенту: облікових записів користувачів, публікацій, категорій, тегів, коментарів тощо.
2. Організація даних: необхідно чітко визначити зв'язки між різними типами даних (наприклад, кожен пост належить автору, може мати кілька категорій та тегів, до нього можуть бути залишені коментарі). Це полегшує пошук, фільтрацію та управління даними.
3. Забезпечення цілісності даних: використання обмежень (NOT NULL, UNIQUE, FOREIGN KEY) гарантує консистентність та валідність даних у базі.
4. Ефективні запити: система запитів повинна гнучко та ефективно отримувати необхідну інформацію з бази даних для відображення на веб-сайті, формування стрічок новин, пошуку за ключовими словами тощо.

Така структура бази даних використовується для реалізації бекенд-частини блог-платформ. Наприклад, персональні блоги, для ведення власних онлайн-щоденників; тематичні блоги – платформи (технології, подорожі, кулінарія); корпоративні блоги, для публікації новин, статей, експертних думок; новинні веб-сайти, для управління статтями та іншим контентом, тощо.

Історично для таких систем в якості сховища даних обирали реляційну базу даних (наприклад,

MySQL, PostgreSQL, SQLite). Але з ростом якості та об'єму контенту, що зберігається та обробляється, збільшенням кількості користувачів, є сенс використовувати документоорієнтовану структуру бази даних. Такий підхід дозволить суттєво прискорити роботу блог-платформи та зняти проблеми, пов'язані з масштабуванням бази даних.

Технології RDBMS/SQL і NoSQL мають дуже різні підходи до представлення даних. У цій роботі зроблено спробу показати на прикладах, яким чином RDBMS/SQL, його функціонал і мова запитів може бути відображений в базі даних MongoDB.

Кожна база даних MongoDB складається з колекцій, аналогічних тому, як у реляційних системах управління базами даних (RDBMS) бази складаються з таблиць. Кожна колекція зберігає дані у вигляді документів, які по суті відповідають рядкам таблиць SQL. У той час як рядки містять дані у вигляді набору колонок, документи являють собою JSON-подібні структури (BSON у MongoDB). Аналогічно стовпцям SQL, поля в документах задають структуру даних [11].

На рис. 2 зображено базу даних MongoDB, що складається з двох колекцій «posts» та «users», призначених для зберігання інформації про пости та користувачів блог-платформи. Ця структура відповідає предметній області, представлений ER-моделлю на рисунку 3, де інформація про пости міститься в таблицях «Posts», «Comments», «Replies», «Metadata», «Tags», а інформація про користувачів – у таблицях «Users», «Stats» та «Roles».

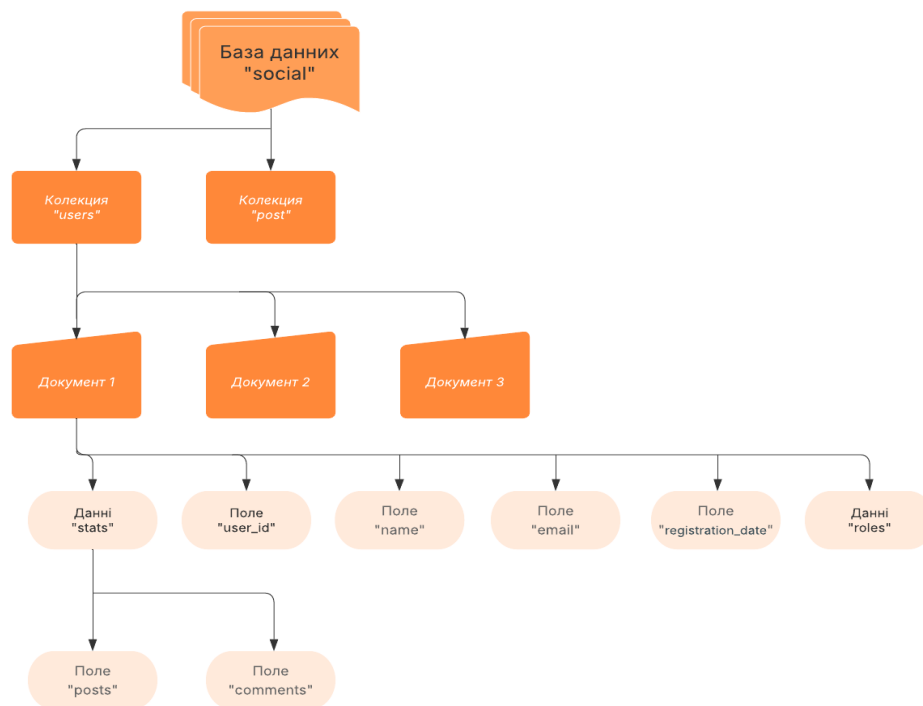


Рис. 2 – Структура даних в MongoDB

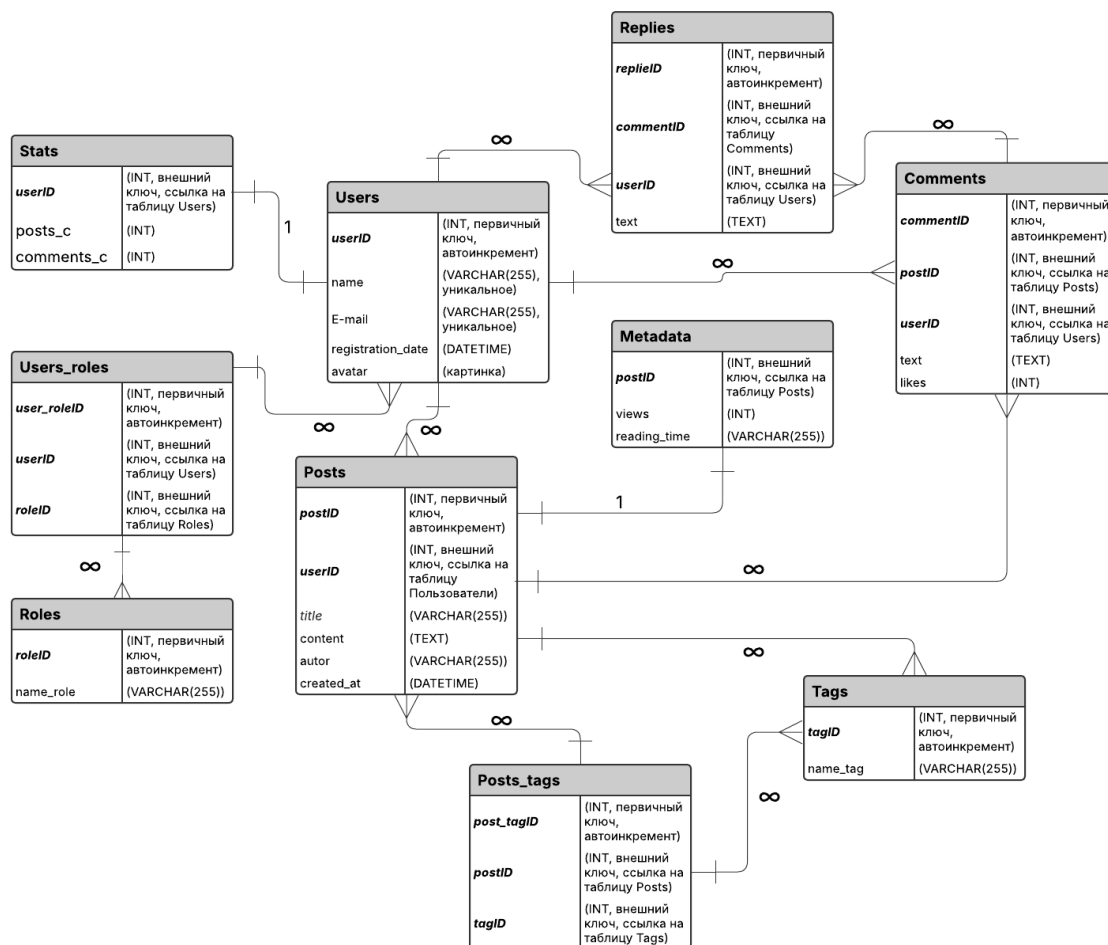


Рис. 3 – Реляційна схема даних для прикладу 1

На рисунку 4 наведено приклади документів (аналог рядків SQL), що містять кілька полів (аналог колонок). В одній колекції документи можуть мати різну структуру: один документ може містити п'ять полів, інший – сім. Наприклад, у першому документі (див. рисунок 4б) є поле «1», якого немає у другому документі. У разі реалізації подібної схеми у RDBMS довелося б додавати додаткову колонку, яка могла б залишатися порожньою у деяких рядків, що займало б зайве місце. Поля легко додавати або видаляти будь-коли, при цьому немає обмежень за типами даних. Наприклад, в одному документі поле може містити ціле число, а в іншому – масив.

Така модель динамічної схеми робить документо-орієнтовані бази даних дуже гнучкими щодо проектування. Різні складні структури (наприклад, ієрархії, деревоподібні схеми), які вимагають кількох зв'язаних таблиць у RDBMS, зручно реалізуються за допомогою документів. Наприклад, пости, коментарі, лайки та інша пов'язана інформація можуть зберігатися в одному документі, а не розподілятися за кількома

таблицями. Це дозволяє при необхідності швидко змінювати структуру документів і адаптувати їх під вигоди, що змінюються.

У реляційних базах даних зв'язки реалізуються через первинні та зовнішні ключі, а також за допомогою JOIN-запитів. Для нашого прикладу, щоб відтворити зв'язки багато-до-багатьох у реляційній базі даних, потрібно створити навіть дві допоміжні таблиці. У MongoDB прямих аналогів зв'язків немає, але їх можна реалізувати за допомогою посилань на інші документи чи вкладених документів. Зазвичай у MongoDB використовується автоматично створюване поле `_id` як унікальний ідентифікатор документа. У нашому прикладі колекції «posts» та «users» пов'язані через поле `user_id`, яке містить ідентифікатор користувача. Важливо пам'ятати, що в MongoDB зв'язки та операції з ними вимагають ретельного відстеження, тому що немає обмежень на зовнішні ключі. Якщо вставити посилання на неіснуючий документ, то помилка фіксуватися системою не буде, на відміну від SQL, де це викликає помилку цілісності даних.


```

_id: "65a1b2c3d4e5f6a789b1c2d3"
title: "Що таке NoSQL?"
author: Object
  user_id: "user001"
  name: "Анна Коваленко"
  avatar: "/avatars/anna.jpg"
content: "NoSQL – це нереляційні бази даних..."
tags: Array (2)
  0: "технології"
  1: "бази даних"
created_at: "2024-05-20T10:00:00Z"
comments: Array (1)
  0: Object
    user_id: "user003"
    text: "Дуже корисна стаття!"
    likes: 5
    replies: Array (1)
      0: Object
        user_id: "user002"
        text: "Повністю згоден!"
metadata: Object
  views: 1500
  reading_time: "5 хв"

```

а)

```

_id: ObjectId('682a1ec0aeef6fa0c62d936e')
user_id: "user001"
name: "Анна Коваленко"
email: "anna@example.com"
registration_date: 2023-01-15T00:00:00.000+00:00
roles: Array (2)
  0: "author"
  1: "editor"
stats: Object
  posts: 12
  comments: 45

```

б)

```

_id: ObjectId('682a1ec0aeef6fa0c62d936f')
user_id: "user002"
name: "Максим Шевченко"
email: "max@example.com"
registration_date: 2023-02-20T00:00:00.000+00:00
roles: Array (1)
  0: "author"
stats: Object
  posts: 5
  comments: 10

```

Рис. 4 – Приклади документів створених в MongoDB: а) документ з колекції «posts»; б) документи з колекції «users»

Використання вкладених документів (див. рисунок 5) дозволяє створювати складні та ієрархічні структури всередині одного документа, використовуючи типи даних Array та Object.

```

roles: Array (2)
  0: "author"
  1: "editor"
metadata: Object
  views: 1500
  reading_time: "5 хв"

```

Рис. 5 – Приклади вкладених документів

Вибір між використанням посилання або вбудованого вкладеного документа залежить від ситуації. Якщо передбачається, що вкладені дані можуть

збільшитися з часом, краще використовувати посилання, щоб уникнути занадто великого розміру документа. Якщо кількість вкладених елементів обмежена, зручно використовувати вбудовані документи.

Бази даних документів надають мову запитів або API, що дозволяють працювати з даними, що зберігаються. У MongoDB можна виконувати операції створення, читання, оновлення та видалення баз даних, колекцій та документів, а також окремих їх полів.

На рисунку 6, представлено приклади виконання запитів: а) додавання посту до колекції posts; б) пошук інформації за умовою (про пост за назвою «Новий пост»); в) оновлення даних у посту (дані значення поля likes).

```

> use social
< switched to db social
> db.posts.insertOne({
  title: "Новий пост",
  content: "Привіт, світ!",
  likes: 0,
  comments: []
});
< {
  acknowledged: true,
  insertedId: ObjectId('6860dba75b3cccc11f1a7898')
}

```

а)

```

> db.posts.find({ title: "Новий пост" });
< {
  _id: ObjectId('6860dba75b3cccc11f1a7898'),
  title: 'Новий пост',
  content: 'Привіт, світ!',
  likes: 0,
  comments: []
}

```

б)

```

> db.posts.updateOne(
  { title: "Новий пост" },
  { $set: { likes: 10 } }
);
< {
  acknowledged: true,
  insertedId: null,
  matchedCount: 1,
  modifiedCount: 1,
  upsertedCount: 0
}

```

в)

Рис. 6 – Приклади виконання запитів в MongoDB: а) додавання посту, команда db.MyCollection.insertOne(); б) пошук інформації за умовою; в) оновлення даних

Структура ДООБД починається з кореневого вузла, тоді листові вузли містять кінцеві дані. Пошук здійснюється за принципом «ключ-значення», тому не підходить для складних запитів через складність пошуку між колекціями та можливі проблеми з узгодженістю даних.

Вибір конкретної моделі залежить від обсягу, складності та масштабованості платформи. Реляційні бази даних мають структуру таблиць із зв'язками між ними, що забезпечує цілісність і складні запити, тоді як документоорієнтовані бази даних пропонують більшу гнучкість у структурі даних, динамічне додавання полів та зручність для ієрархічних та складних структур. MongoDB особливо підходить для швидкої адаптації та збереження складних об'єктів у вигляді документів, що робить її ефективним рішенням для сучасних блог-систем.

Приклад 2. Інтернет-магазин

Документоорієнтована модель MongoDB ідеально підходить для інтернет-магазинів, де:

- товари мають багато варіацій (розміри, кольори);

- потрібна швидка робота з даними (пошук, фільтрація);

- немає необхідності в складних JOIN-запитах.

Якщо потрібно реалізувати складні зв'язки (наприклад, замовлення з багатьма товарами), можна використовувати референційну модель (посилання на інші документи).

У моделі MongoDB кожен товар може бути представлений у вигляді єдиного документу, який містить усю необхідну інформацію, включаючи варіації (кольори, розміри, характеристики тощо). Це дозволяє уникнути складнощів, пов'язаних із реляційними зв'язками (JOIN-запити), і забезпечує швидкий доступ до даних. Усі дані про товар (включаючи наявність на складі) завантажуються одним запитом. Також MongoDB дозволяє швидко фільтрувати, сортувати та групувати товари (наприклад, знайти всі футболки розміру «М»).

На рисунках 7, 8 зображено структури реляційної бази даних (рис. 7) та даних MongoDB (рис. 8).

На рисунку 9 наведено приклади документів, що можна використовувати для формування структури бази даних для інтернет-магазину.

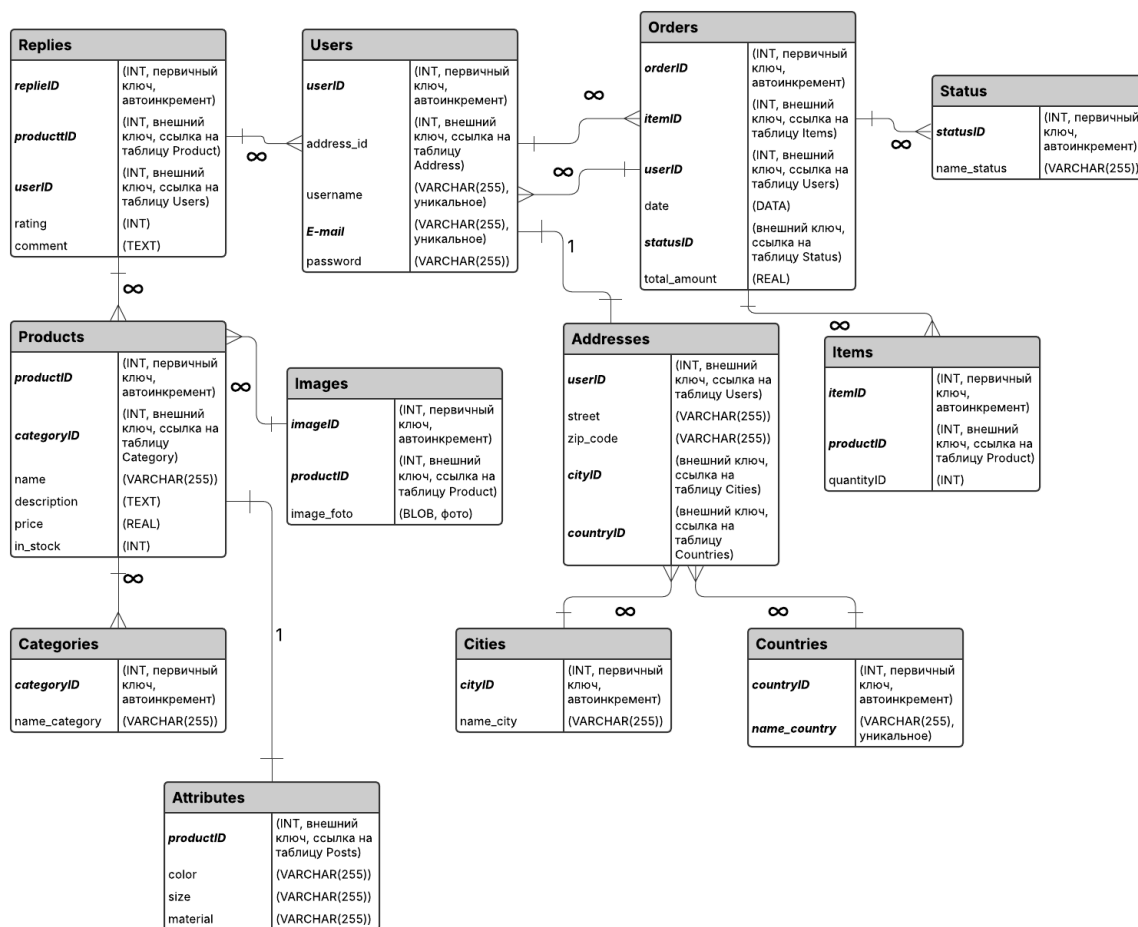


Рис. 7 – Відповідність структур даних для прикладу 2: реляційна схема даних

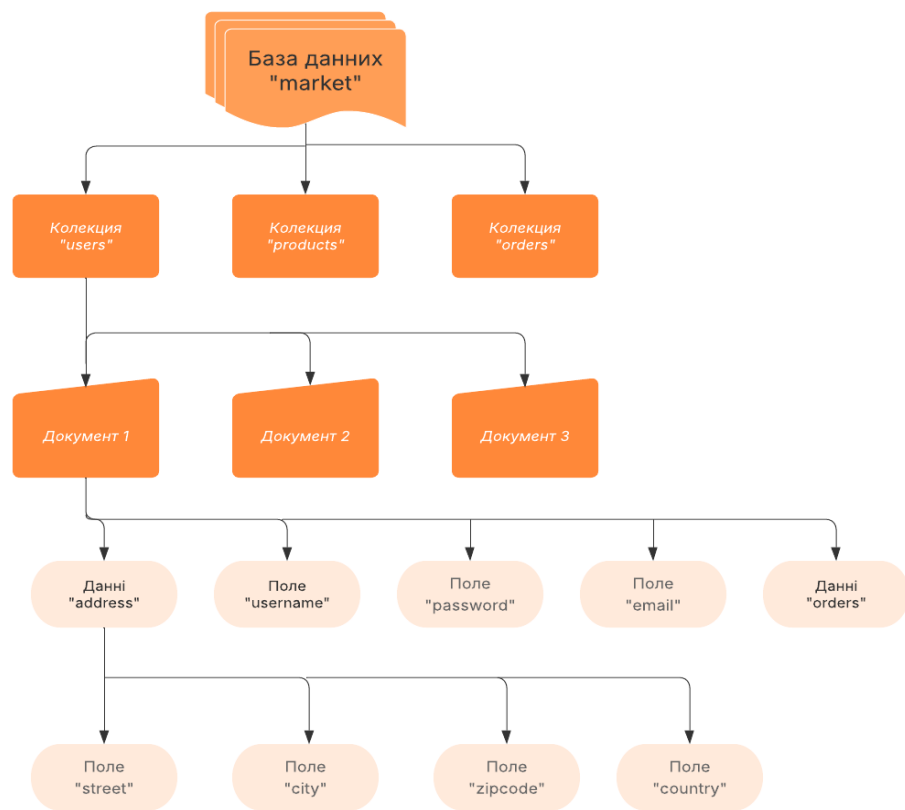


Рис. 8 – Відповідність структур даних для прикладу 2: структура даних в MongoDB

```

_id: ObjectId('685faf566f2cd03abe95ec47')
user_id: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a1e"
date: 2024-06-27T10:30:00.000+00:00
status: "доставлений"
items: Array (2)
  0: Object
    product_id: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a1c"
    quantity: 1
  1: Object
    product_id: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a1d"
    quantity: 2
total_amount: 1038.99

```

```

_id: ObjectId('685faf3f6f2cd03abe95ec43')
username: "user123"
email: "user123@example.com"
password: "hashed_password_string_1"
address: Object
  street: "вул. Прикладна, 10"
  city: "Київ"
  zip_code: "01001"
  country: "Україна"
orders: Array (2)
  0: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a20"
  1: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a21"

```

```

_id: ObjectId('685faf566f2cd03abe95ec48')
user_id: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a1f"
date: 2024-06-28T11:00:00.000+00:00
status: "в обробці"
items: Array (1)
  0: Object
    product_id: "60c72b2f9f1d4f001c8c4a1e"
    quantity: 3
total_amount: 58.5

```

```

_id: ObjectId('685faf3f6f2cd03abe95ec44')
username: "user321"
email: "user321@example.com"
password: "hashed_password_string_2"
address: Object
  street: "вул. Свободи, 5"
  city: "Львів"
  zip_code: "79000"
  country: "Україна"
orders: Array (empty)

```

а)

б)

Рис. 9 – Приклади документів, створених в MongoDB для інтернет-магазину: а) колекція orders; б) колекція users



Рис. 10 – Приклади виконання запитів в MongoDB: а) пошук користувачів у місті Львів; б) продукти у категорії «Одяг»; в) оновлення даних

Приклади запитів, які можна поставити до бази даних «інтернет-магазин», представлено на рисунку 10.

Для швидкого пошуку товарів та фільтрації за різними параметрами використовують індекси, що значно підвищує продуктивність запитів. Крім того, MongoDB підтримує масштабування шардуванням, що дозволяє рівномірно розподіляти дані кількома серверами. Завдяки горизонтальному масштабуванню, MongoDB може обробляти великі обсяги даних та високий трафік, що важливо для інтернет-магазинів із зростаючою відвідуваністю. Також варто відзначити вбудовану реплікацію та автоматичне відновлення даних, що забезпечує високу надійність системи. Важливою особливістю є можливість зберігання зображень та мультимедійних файлів у базі даних за допомогою GridFS. В цілому, MongoDB дозволяє створювати гнучкі та масштабовані рішення для інтернет-магазинів, забезпечуючи швидку роботу та зручність управління даними.

Перехід від реляційної структури даних до документоорієнтованої для сайту (блогу, або інтернет-магазину) спричиняє зміну способу зберігання та організації інформації. Такий перехід має свої переваги та недоліки.

Документоорієнтовані бази краще підходять для проектів, де структура даних може змінюватися з часом, тобто для сайтів, що потребують горизонтального масштабування (розподіл навантаження на кілька серверів). Перевага розробки за рахунок можливості зберігати складні структури даних в одному документі, уникаючи складних JOIN операцій, які часто використовуються в реляційних базах, також приваблива для розробників сайтів. У деяких випадках, для певних типів запитів документоорієнтовані бази даних можуть забезпечувати кращу продуктивність, особливо при роботі з даними, які не потребують складної структури зв'язків.

Перенесення існуючих даних з реляційної бази до документоорієнтованої може вимагати значних зусиль та часу. Перехід вимагає перегляду архітектури програми, щоб адаптувати її до нових принципів роботи з даними. Так само, відсутність суворої структури даних у документоорієнтованих базах може призвести до проблем узгодженості даних, якщо не буде розроблено відповідну систему валідації та управління даними.

Рішення про перехід має ухвалюватися на основі конкретних вимог проекту. Якщо сайт має складну структуру даних, вимагає високої гнучкості та масштабованості, а також не вимагає суворого зв'язку між даними, то перехід на документоорієнтовану базу даних може бути виправданий. Якщо ж сайт має строгую структуру даних, вимагає високого ступеня узгодженості даних і не має проблем із масштабуванням, то перехід може виявитися недоцільним.

Висновки

У рамках цього дослідження створено глибоке розуміння особливостей та можливостей документоорієнтованих баз даних, проілюстровано їхню реалізацію на прикладах популярних задач, а також сформульовано рекомендації щодо їхнього застосування у сучасних інформаційних системах. Для цього було виконано наступні дослідження:

- аналіз сучасних тенденцій та обґрунтування актуальності використання NoSQL баз даних у сучасних інформаційних системах для підвищення гнучкості, масштабованості та продуктивності;
- вивчено особливості документоорієнтованих баз даних, зокрема MongoDB, як ефективного інструменту для зберігання складних та ієрархічних структур даних у розробці веб-додатків;
- порівняно реляційні бази даних з документоорієнтованими моделями, показано переваги та недоліки кожної архітектури, а також можливості їхнього поєднання та переходу між ними;

– на основі прикладів для двох типових завдань («блог-платформа» та «інтернет-магазин») розроблено структури даних у документоорієнтованій базі MongoDB, ілюстровано їхню реалізацію, в тому числі через створення колекцій і зразків документів;

– продемонстровано, як можна моделювати зв'язки та реалізовувати запити в MongoDB, порівняно з реляційною моделлю, забезпечуючи розуміння принципів роботи та особливостей кожної підходу;

– проведено аналіз переваг та викликів переходу від реляційної до документоорієнтованої моделі, враховуючи питання гнучкості, масштабованості, цілісності даних та архітектурних особливостей;

– надано рекомендації щодо застосування й вибору відповідної моделі баз даних залежно від специфіки проекту, а також можливості автоматизації переходу між цими моделями.

Перелік використаних джерел

- [1] NoSQL: Future of BigData Analytics Characteristics and Comparison with RDBMS / M. Arshad et al. *The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems. Studies in Computational Intelligence*; edited by M. Alshurideh et al. 2023. Vol. 1056. Pp. 1927-1951. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-12382-5_106.
- [2] A state of art survey for Big Data processing and NoSQL database architecture / Ali A., Naeem S., Anam S., Ahmed M. *International Journal of Computing and Digital Systems*. 2023. Vol. 14, no. 1. Pp. 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.12785/ijcds/140124>.
- [3] Faridoon A., Imran M. Big Data Storage Tools Using NoSQL Databases and Their Applications in Various Domains: A Systematic Review. *Computing & Informatics*. 2021. Vol. 40, no. 3. Pp. 489-521. DOI: https://doi.org/10.31577/cai_2021_3_489.
- [4] Kraiem M.B., Feki J. Building a Data Warehouse for Social Media: Review and Comparison. *Computación y Sistemas*. 2024. Vol. 28, no. 1. Pp. 19-39. DOI: <https://doi.org/10.13053/cys-28-1-4677>.
- [5] Tripathi N. NoSQL database education: A review of models, tools and teaching methods. *Journal of Systems and Software*. 2025. Vol. 226. Article 112391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112391>.
- [6] Document-Oriented Data Organization for Unmanned Aerial Vehicle Outputs / S. Azri et al. *Journal of Advances in Information Technology*. 2021. Vol. 12, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.12720/jait.12.4.267-278>.
- [7] Ionescu S.A., Radu A.O. Assessment and Integration of Relational Databases, Big Data, and Cloud Computing in Financial Institutions: Performance Comparison. *International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Craiova, Romania, 04-06 September 2024. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/INISTA62901.2024.10683852>.
- [8] Matias R., Piedade M.B. Multidimensional Models Supported by Document-Oriented Databases. *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*, Salamanca, Spain, 5-7 September 2023. Pp. 156-167. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-40725-3_14.
- [9] Tandya W., Azizah F.N. Migration of Relational Database to NoSQL Document-Oriented Database. *IEEE International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE)*, Toba, Indonesia, 07-08 September 2023. Pp. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICoDSE59534.2023.10291584>.
- [10] Peretiatko M., Shirokopetleva M., Lesna N. Research of methods to support data migration between relational and document data storage models. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2022. Vol. 2, no. 20. Pp. 64-74. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.20.064>.
- [11] MongoDB Home Page. URL: <https://www.mongodb.com> (дата звернення: 26.11.2024).

EXAMPLES OF DESIGNING A DOCUMENT-ORIENTED DATABASE IN MONGODB

Yelfimov D.	Bachelor's student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: yelfimov_d_s@students.pstu.edu ;
Vorotnikova Z.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0746-5981 , e-mail: vorotnikova_z_j@pstu.edu

The article provides a detailed exploration of the features and advantages of using document-oriented databases (NoSQL) as a modern alternative to traditional relational database management systems. In the context of the rapid development of the modern digital economy and the increasing need for flexible, scalable, and high-performance solutions, the authors analyze the possibilities of applying NoSQL databases across various fields. This includes web and mobile applications, content management systems, online stores, and other areas where speed and scalability are critical factors. A comprehensive comparative analysis is conducted between relational and document-oriented data storage models to highlight their key differences and benefits. For each model, practical application examples and distinctive features that determine their suitability for different tasks are presented. Special attention is given to examples of designing and implementing databases for specific platforms, such as blog platforms and online stores, using MongoDB. These examples emphasize

the flexibility of data structures, high-speed data access, and the ability to scale in response to growing user demands. The authors analyze the advantages of each model, as well as discuss their limitations, underscoring the importance of choosing the appropriate database architecture based on the nature and requirements of a particular task. Overall, the article aims to promote modern data storage technologies and highlights the relevance of researching and implementing NoSQL databases to enhance the efficiency, flexibility, and adaptability of information systems in the current era of digital technologies. It facilitates understanding of how the correct choice of database architecture can positively impact development speed, scalability, and the long-term stability of information systems.

Keywords: DBMS, RDBMS, NOSQL, JSON, JOIN, MongoDB, document-oriented databases, blog platform, online store.

References

- [1] M. Arshad, M. Brohi, T. Soomro, T. Ghazal, H. Alzoubi, and M. Alshurideh, «NoSQL: Future of Big-Data Analytics Characteristics and Comparison with RDBMS», in *The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems. Studies in Computational Intelligence*, M. Alshurideh, B.H. Al Kurdi, R. Masa'deh, H.M. Alzoubi, S. Sal-loum, Eds., 2023, vol 1056, Springer, Cham, pp. 1927-1951. **doi: 10.1007/978-3-031-12382-5_106**.
- [2] A. Ali, S. Naeem, S. Anam, and M. Ahmed, «A state of art survey for Big Data processing and NoSQL database architecture», *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 1-1, 2023. **doi: 10.12785/ijcds/140124**.
- [3] A. Faridoon, and M. Imran, «Big Data Storage Tools Using NoSQL Databases and Their Applications in Various Domains: A Systematic Review», *Computing & Informatics*, vol. 40, no. 3, pp. 489-521, 2021. **doi: 10.31577/cai_2021_3_489**.
- [4] M.B. Kraiem, and J. Feki, «Building a Data Warehouse for Social Media: Review and Comparison», *Computación y Sistemas*, vol. 28, no. 1, pp. 19-39, 2024. **doi: 10.13053/cys-28-1-4677**.
- [5] N. Tripathi, «NoSQL database education: A review of models, tools and teaching methods», *Journal of Systems and Software*, vol. 226, article 112391, 2025. **doi: 10.1016/j.jss.2025.112391**.
- [6] S. Azri, U. Ujang, W. Embong, M. Cuetara, and G. Miguel, «Document-Oriented Data Organization for Unmanned Aerial Vehicle Outputs», *Journal of Advances in Information Technology*, vol. 12, no. 4, 2021. **doi: 10.12720/jait.12.4.267-278**.
- [7] S.A. Ionescu, and A.O. Radu, «Assessment and Integration of Relational Databases, Big Data, and Cloud Computing in Financial Institutions: Performance Comparison», in Proc. of the Int. Conf. on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), Craiova, Romania, 2024, pp. 1-7. **doi: 10.1109/INISTA62901.2024.10683852**.
- [8] R. Matias, and M.B. Piedade, «Multidimensional Models Supported by Document-Oriented Databases», in Proc. of the Int. Conf. on Hybrid Artificial Intelligence Systems, Salamanca, Spain, 2023, pp. 156-167, 2023. **doi: 10.1007/978-3-031-40725-3_14**.
- [9] W. Tandya, and F.N. Azizah, «Migration of Relational Database to NoSQL Document-Oriented Database», in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Data and Software Engineering (ICoDSE), Toba, Indonesia, 2023, pp. 180-185, 2023. **doi: 10.1109/ICoDSE59534.2023.10291584**.
- [10] M. Peretiatko, M. Shirokopetleva, and N. Lesna, «Research of methods to support data migration between relational and document data storage models», *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, vol. 2, no. 20, pp. 64-74, 2022. **doi: 10.30837/ITSSI.2022.20.064**.
- [11] MongoDB Home Page. [Online]. Available: <https://www.mongodb.com>. Accessed on: November 26, 2024.

Стаття надійшла 25.03.2025

Стаття прийнята 18.04.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Єлфімов Д.С., Воротнікова З.Є. Приклади проектування документоорієнтованої бази даних в MongoDB. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336268>.

131 ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

UDC 621.9.07

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336269

EFFECT OF CLEARANCE ON RESIDUAL STRESS AND QUALITY
IN ROLLED TUBE-TUBESHEET CONNECTIONS

Stovpnyk O.V.	PhD (Engineering), associate professor, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4391-6644 , e-mail: o.v.stovpnyk@ust.edu.ua ;
Kabat O.S.	D.Sc. (Engineering), professor, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7995-5333 , e-mail: o.s.kabat@ust.edu.ua ;
Ved' V.V.	senior lecturer, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2391-6463 , e-mail: v.v.ved@ust.edu.ua

The quality of the tube-to-tubesheet joint is a critical factor determining the reliability and durability of heat exchangers and various types of industrial equipment operating under demanding conditions. This article examines the influence of the clearance between the tube and the tubesheet hole on the magnitude of residual stresses in the joint following the tube rolling process. The experimental component of the study involved precise measurements of actual clearances using specialized tools, the calculation of residual stresses through the mechanical stress relief method, and a comprehensive statistical analysis of the collected data to ensure accuracy and consistency. The findings revealed that the actual clearance typically exceeds the nominal value specified in design standards, and an increase in this clearance directly correlates with a rise in residual stresses within the joint. Notably, the highest stress levels were observed at clearances of 0.40 mm and greater, which may lead to localized plastic deformation, compromising the structural integrity and reducing the fatigue strength of the joint over time. Based on the analysis, the optimal clearance range was determined to be between 0.10 mm and 0.30 mm, as it strikes a balance between ensuring joint reliability and maintaining acceptable stress levels, thus minimizing the risk of premature failure. To validate the reliability of the experimental results, advanced statistical methods were employed, including the calculation of standard deviation to assess data variability and the application of Student's t-test to evaluate the significance of the observed trends. These calculations confirmed a statistically significant relationship between clearance size and residual stress levels, with particularly pronounced effects observed in joints involving small-diameter tubes, where tolerances are more critical. The outcomes of this research have practical implications for the design and manufacturing of shell-and-tube heat exchangers, offering a pathway to optimize joint parameters, enhance operational performance, and extend service life. Additionally, the study provides detailed practical recommendations for quality control, including precise methods for measuring clearances with high accuracy and evaluating residual stresses during production and maintenance processes.

Keywords: tube rolling, residual stresses, clearance, quality control, process parameters, reliability, durability.

Statement of the problem

The quality and reliability of tube-to-tubesheet joints play a crucial role in the performance and longevity of heat exchangers, boilers, and other industrial installations. Ensuring a consistently high-quality joint requires an integrated approach encompassing material selection, manufacturing precision, and thorough inspection. The primary objective is to achieve a defect-free connection that maintains mechanical integrity under operational conditions, including high pressures, extreme temperatures, and cyclic loads.

Analysis of the latest achievements
on the identified problem

Material selection and control are fundamental in preventing premature failures and ensuring compliance with operational requirements. Callister and Rethwisch as well as Al-Odhaib et al. emphasize that tubes and tubesheets must adhere to specified alloy compositions, verified

through chemical analysis and mechanical property tests, including tensile strength, elongation, and corrosion resistance [1, 2]. Groover and Yoganathan et al. further support this by highlighting the importance of material selection in extending service life [3, 4]. Additionally, Roberge noted that the compatibility between tube and tubesheet materials is essential to mitigate galvanic corrosion risks, particularly in electrolytic environments [5].

Incoming inspection procedures ensure material integrity before manufacturing. Certification documents, spectral analysis for alloy verification, and mechanical testing in accordance with ASTM E8/E8M or EN ISO 6892-1 validate compliance with required standards. Sharma et al. examined critical geometric parameters such as tube wall thickness, ovality, and surface roughness of tubesheet holes, confirming their necessity in maintaining dimensional accuracy and optimizing the tube fitting process [6]. Thulukkanam emphasized that proper preparation, including abrasive cleaning and degreasing, enhances surface conditions, reducing the likelihood of

contamination-related defects [7]. Gissler and Jehn highlighted the importance of eliminating residual oxides and surface imperfections through precision cleaning techniques, which significantly improve the adhesion and mechanical properties of the joint [8].

The joint formation technique largely depends on the fastening method. One of the most widely used approaches is tube rolling, which relies on radial compression to create a tight interference fit between the tube and the tubesheet. Budynas and Nisbett describe this process in detail [9]. Boulougouras and Besseris found that the precision of the rolling process is a key determinant of joint performance, as insufficient compression can lead to leakage, whereas excessive deformation may induce microcracks, compromising structural integrity [10]. As demonstrated in the work of Stovpnyk and Kyrlyuk, modern rolling tools equipped with digital force control mechanisms significantly improve process repeatability and minimize human error [11]. Optimizing rolling force and tube expansion parameters plays a crucial role in reducing residual stress concentration and improving fatigue resistance.

Residual stress formation in tube-to-tubesheet joints is a critical factor affecting fatigue life. Schajer and Ruud highlight that localized stresses can accelerate crack propagation, particularly in aggressive service environments [12]. The presence of high residual stresses, if not controlled, may lead to stress corrosion cracking (SCC), especially in chloride-containing environments. Abubakar, Mori, and Sumner provide a detailed review of SCC factors [13]. The ring core method and strain gauging techniques are commonly employed to assess residual stress distribution, providing valuable insights into the long-term reliability of rolled joints. Li et al. discuss advancements in these measurement methods [14]. An advanced computational model for predicting residual stress patterns can be used to optimize rolling conditions and prevent premature failures. Tabatabaieian et al. offer a comprehensive review of such models [15].

Leak testing and final quality control measures ensure the structural integrity and operational safety of tube-to-tubesheet joints. Hydraulic pressure tests exceeding the operating pressure by 25-50% help detect potential defects such as cracks, insufficient rolling, or improper fitting. For applications involving vacuum or gas media, pneumatic testing using inert gases like helium or nitrogen, in conjunction with leak detection methods, is employed to identify micro-leaks. Ebrahimi and Mofrad explore the specifics of pneumatic testing [16]. Advanced non-destructive techniques, including ultrasonic flaw detection and radiographic inspection, further enhance quality assurance.

The optimization of rolling parameters is an ongoing area of research aimed at improving joint durability and performance. Smith and Johnson stress the importance of studying joint behavior under cyclic loading conditions to fully evaluate fatigue resistance [17]. The present study investigates the relationship between initial clearance and residual stress distribution, contributing to the development of best practices for tube rolling in industrial applications.

To assess the mechanical characteristics and stress state in the joint, the ring core method provides accurate residual stress measurements. Václavík et al. validate its effectiveness [18]. Experimental testing involves varying the diameter of tubesheet holes while controlling tube dimensions before rolling, allowing for a statistically significant dataset. Real-time monitoring of deformation parameters during rolling ensures optimal stress distribution and mechanical stability. The results of this study offer practical recommendations for optimizing rolling parameters, ultimately enhancing the reliability of tube-to-tubesheet joints in high-performance heat exchangers and related equipment.

By integrating advanced material control, precision manufacturing, and comprehensive quality assurance, the robustness of tube-to-tubesheet joints can be significantly improved. This multidisciplinary approach is particularly critical for high-risk applications such as power plants, chemical reactors, and aerospace systems, where structural integrity under extreme conditions is paramount.

Purpose and task statement

The main goal of the work is to assess the deviations of the actual clearance between the tube and the tubesheet hole from the nominal, taking into account technological errors.

Materials and Methods

The study of the influence of clearances and manufacturing tolerances on the quality of tube-to-tubesheet joints was carried out as part of a laboratory experiment. The geometry of the tube connection with the hole in the tubesheet directly affects the strength, tightness, and performance characteristics of heat exchangers.

For the experiment, tubes with nominal diameters of 16, 19, 20, and 25 mm were used, made of structural steel P245GH (DSTU EN 10216-2). The tubes were 150 mm long and had a wall thickness of 2 mm. Holes of various diameters were made in specially prepared plates of structural low-alloy steel P355NL2 (DSTU EN 10028-3) with a thickness of 35 mm. For each tube diameter, nominal radial clearances were selected in the range from 0.05 mm to 0.50 mm in increments of 0.05 mm, which allowed for the study of 10 clearance values for each diameter.

The actual tube diameter was measured using a micrometer with an accuracy of ± 0.01 mm. The hole diameter was measured using a digital caliper with an accuracy of ± 0.02 mm. The actual clearance between the tube and the hole was determined by inserting the tube into the hole and then measuring the clearance using a set of feeler gauges with a step of 0.01 mm. To minimize errors, each combination was measured at least three times, after which the average value was calculated.

An important aspect of the study was the tolerances for the diameter of the tubes and holes. Tolerances for tube diameters varied within ± 0.05 mm, and for hole diameters

- within ± 0.06 mm. These errors were taken into account when analyzing the results.

The rolling process (not discussed in detail in this article, but mentioned for the completeness of the description of the experimental setup) was carried out on a PowerMaster machine with adjustable force via MPG-3, equipped with roller expanders. To minimize friction during rolling, I-20 oil was used.

The nominal clearance C_n was calculated as the difference between the hole diameter D_h and the tube diameter D_t :

The actual clearance C_r , taking into account random deviations in the hole diameter ΔD_h and tube diameter ΔD_t , can be represented as follows

$$C_r = (D_h + \Delta D_h) - (D_t + \Delta D_t), \quad (1)$$

where ΔD_h and ΔD_t are random errors distributed according to the normal law with a standard deviation $\sigma = 0.01$ mm (according to the data provided).

The deviation of the actual clearance (ΔC) from the nominal

$$\Delta C = C_r - C_n, \quad (2)$$

Statistical data processing included calculating the average value ($\bar{x}$) and standard deviation (σ) for each group of measurements

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

where: x_i is the measured value of the parameter (tube diameter, hole diameter, actual clearance); n is the number of measurements (in each group $n = 10$).

To test the statistical significance of the difference between the average actual clearance and the average nominal clearance, a one-sample Student's t-test was used. The t-statistic was calculated

$$t = \frac{\bar{C}_r - \bar{C}_n}{\sigma_{C_r} \cdot \sqrt{n}}, \quad (5)$$

where: C_r is the average actual clearance in the sample; C_n is the average nominal clearance (0.275 mm); σ_{C_r} is the standard deviation of the actual clearance; n is the sample size.

The p-value (two-sided probability) was determined from the t-statistic and the number of degrees of freedom ($d_f = n - 1$). The null hypothesis (H_0 : the average actual clearance is equal to the average nominal clearance) was rejected if the p-value was less than the significance level $\alpha = 0.05$.

Summary of the main material

The tables below present data reflecting the actual clearance sizes obtained during the study of heat exchanger tube joints with the tubesheet. In particular, Table 1 contains the measurement results for tubes with a nominal diameter of 16 mm installed in holes of the corresponding size. This table shows the values of nominal and actual clearances, as well as the measured diameters of tubes and holes, which allows for analyzing the influence of technological parameters on the geometry of the joint.

Similarly, Table 2 shows the results for tubes with a diameter of 19 mm, which allow for assessing changes in the joint parameters with an increase in the tube diameter. Table 3 contains data obtained in the study of joints for tubes with a nominal diameter of 20 mm, and Table 4 - for tubes with a diameter of 25 mm. The data in all tables make it possible to conduct a comparative analysis of the geometry of the joints, depending on the diameter of the tube and the corresponding hole, as well as to identify trends in the change in the actual clearance during the rolling process. Depending on the diameter, the studied series are divided into groups from 1 to 4 in accordance with the increase in the tube diameter.

Table 5 presents the summary results for all groups, including the average values of the measured parameters.

Table 1

Study of the joint geometry for a tube with a diameter of 16 mm (group 1)

No.	Nominal Clearance (mm)	Tube Diameter (mm)	Hole Diameter (mm)	Actual Clearance (mm)
1.1	0.05	15.95	16.06	0.11
1.2	0.10	16.02	16.12	0.10
1.3	0.15	16.03	16.18	0.15
1.4	0.20	15.98	16.24	0.26
1.5	0.25	15.99	16.30	0.31
1.6	0.30	16.01	16.36	0.35
1.7	0.35	16.00	16.42	0.42
1.8	0.40	15.97	16.48	0.51
1.9	0.45	15.96	16.52	0.56
1.10	0.50	15.97	16.53	0.56

Table 2

Study of the joint geometry for a tube with a diameter of 19 mm (group 2)

No.	Nominal Clearance (mm)	Tube Diameter (mm)	Hole Diameter (mm)	Actual Clearance (mm)
2.1	0.05	18.97	19.04	0.07
2.2	0.10	19.02	19.12	0.10
2.3	0.15	19.03	19.17	0.14
2.4	0.20	18.98	19.21	0.23
2.5	0.25	18.99	19.27	0.28
2.6	0.30	19.01	19.30	0.31
2.7	0.35	19.00	19.36	0.36
2.8	0.40	18.97	19.40	0.43
2.9	0.45	18.96	19.43	0.47
2.10	0.50	18.97	19.51	0.54

Table 3

Study of the joint geometry for a tube with a diameter of 20 mm (group 3)

No.	Nominal Clearance (mm)	Tube Diameter (mm)	Hole Diameter (mm)	Actual Clearance (mm)
3.1	0.05	19.95	20.04	0.09
3.2	0.10	19.97	20.09	0.12
3.3	0.15	19.98	20.15	0.17
3.4	0.20	19.96	20.19	0.23
3.5	0.25	19.95	20.21	0.26
3.6	0.30	19.97	20.29	0.32
3.7	0.35	20.01	20.38	0.37
3.8	0.40	19.97	20.39	0.42
3.9	0.45	19.96	20.40	0.44
3.10	0.5	20.02	20.55	0.53

Table 4

Study of the joint geometry for a tube with a diameter of 25 mm (group 4)

No.	Nominal Clearance (mm)	Tube Diameter (mm)	Hole Diameter (mm)	Actual Clearance (mm)
4.1	0.05	24.95	25.01	0.06
4.2	0.10	25.02	25.13	0.11
4.3	0.15	25.03	25.19	0.16
4.4	0.20	24.98	25.20	0.22
4.5	0.25	24.99	25.27	0.28
4.6	0.30	25.01	25.34	0.33
4.7	0.35	25.00	25.38	0.38
4.8	0.40	24.97	25.40	0.43
4.9	0.45	24.96	25.45	0.49
4.10	0.50	24.97	25.52	0.55

Table 5

Summary results by group

Group	Nominal Tube Diameter (mm)	Average Nominal Clearance (mm)	Average Tube Diameter (mm)	Average Hole Diameter (mm)	Average Actual Clearance (mm)
Group 1	16	0.275	15.988	16.321	0.333
Group 2	19	0.275	18.988	19.271	0.283
Group 3	20	0.275	19.974	20.287	0.313
Group 4	25	0.275	24.988	25.309	0.321

Analysis of the data shows that the average actual clearance, as a rule, exceeds the average nominal clearance in all the studied groups. Figures 1-4 show graphs of the dependence of the actual clearance on the nominal for each group of pipes.

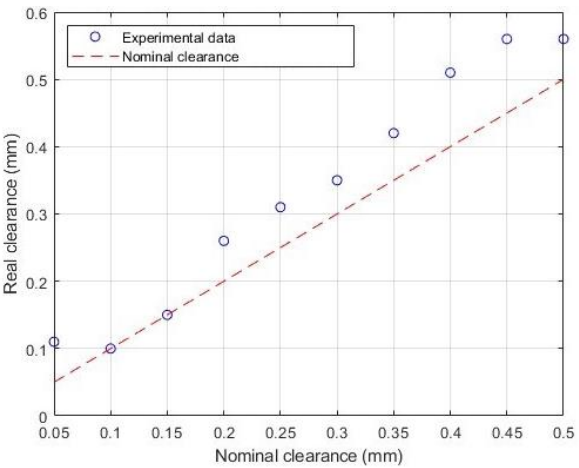


Fig. 1 – Dependence of the actual clearance on the nominal clearance in Group 1 (16 mm)

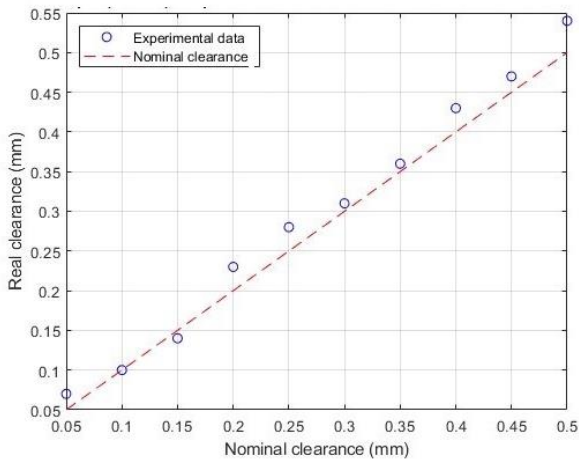


Fig. 2 – Dependence of the actual clearance on the nominal clearance in Group 2 (19 mm)

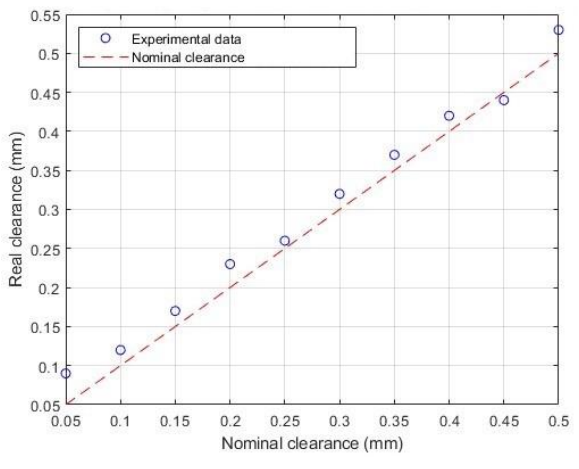


Fig. 3 – Dependence of the actual clearance on the nominal clearance in Group 3 (20 mm)

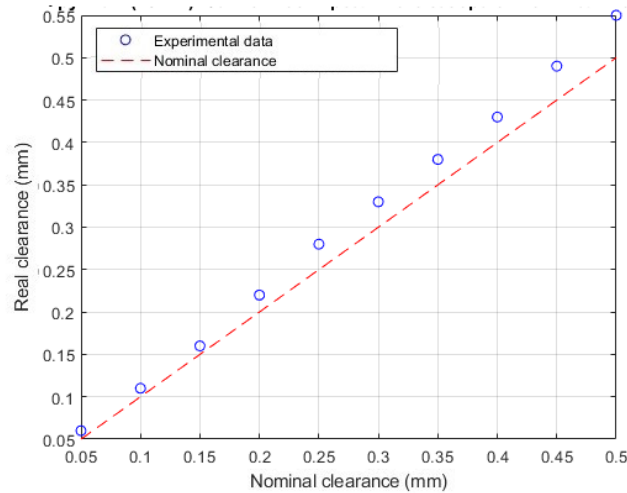


Fig. 4 – Dependence of the actual clearance on the nominal clearance in Group 4 (25 mm)

The graphs clearly demonstrate that the experimental points (blue circles) are located mainly above the line of equality of the nominal and actual clearances (red dotted line). This confirms the trend towards exceeding the actual clearance over the nominal one. The largest deviation is observed for the group of pipes with a diameter of 16 mm.

To assess the scatter of actual clearance values, the standard deviation (σ) was calculated for each group (Table 6).The largest standard deviation, as expected, is observed in group 1 (16 mm), which indicates the largest scatter of actual clearance values in this group.

To test the statistical significance of the difference between the average actual clearance and the average nominal clearance, a Student's t-test was conducted (Table 7). A statistically significant difference between the average actual clearance and the average nominal clearance (at a significance level of 0.05) was found only for the group of pipes with a diameter of 16 mm. For the remaining groups, no statistically significant difference was found.

Figures 5-8 show histograms of the distribution of deviations of the actual clearance from the nominal and graphs of deviations in the order of measurements.

Table 6

Standard deviation of actual clearance	
Group	Standard deviation (mm)
Group 1 (16 mm)	0.163
Group 2 (19 mm)	0.143
Group 3 (20 mm)	0.136
Group 4 (25 mm)	0.142

Table 7

Student's t-test results			
Group	t-statistic	p-value	Conclusion ($\alpha=0.05$)
Group 1 (16 mm)	2.285	0.048	Reject H0
Group 2 (19 mm)	0.155	0.880	Do not reject H0
Group 3 (20 mm)	1.037	0.319	Do not reject H0
Group 4 (25 mm)	1.394	0.187	Do not reject H0

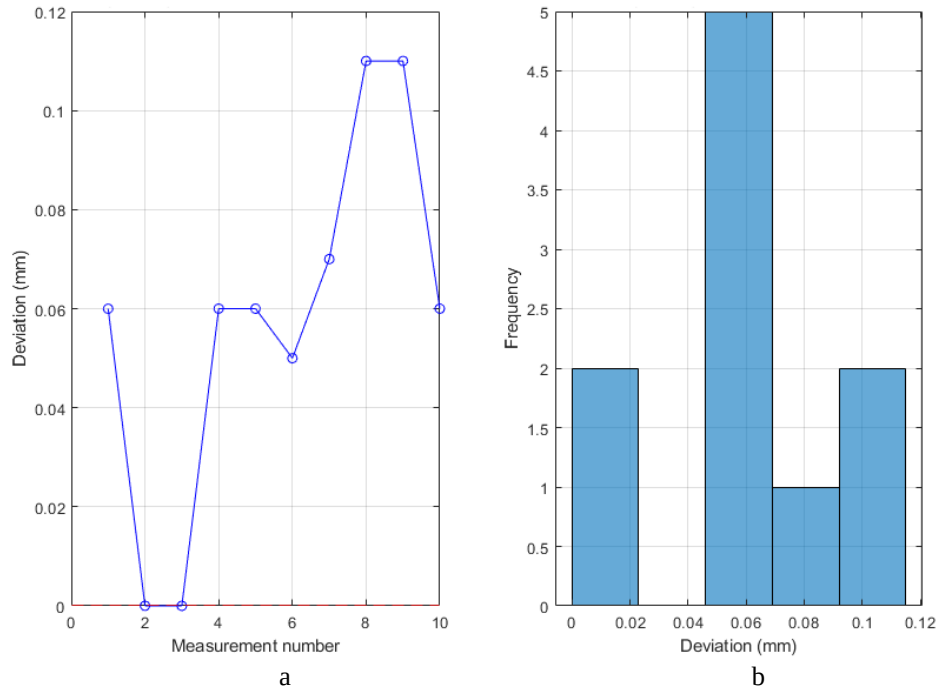


Fig. 5 – Deviations of the actual clearance in Group 1 (16 mm)

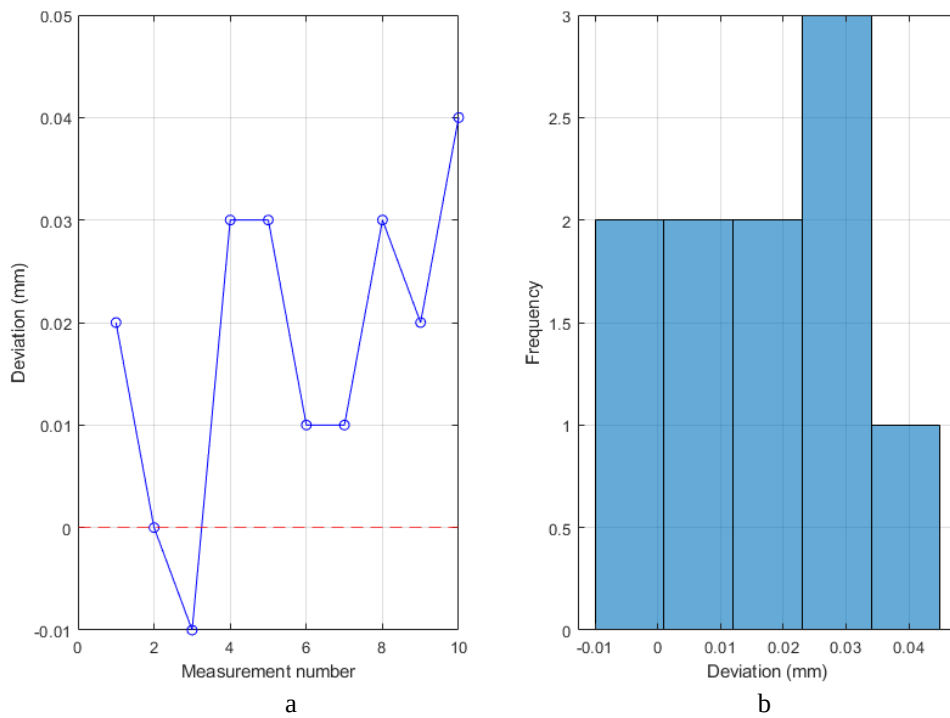


Fig. 6 – Deviations of the actual clearance in Group 2 (19 mm)

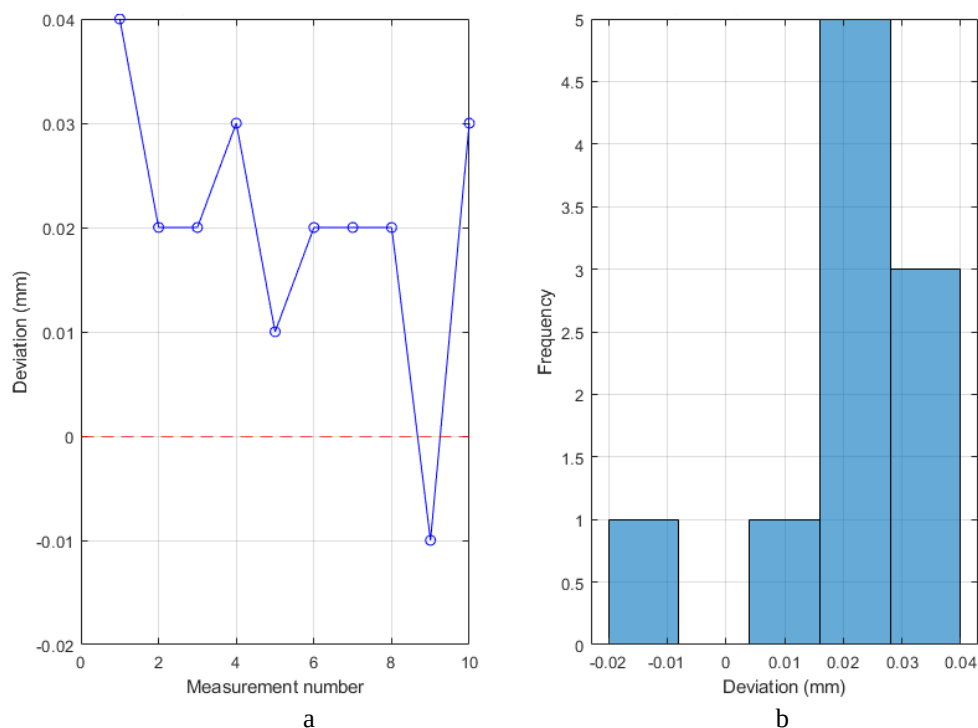


Fig. 7 – Deviations of the actual clearance in Group 3 (20 mm)

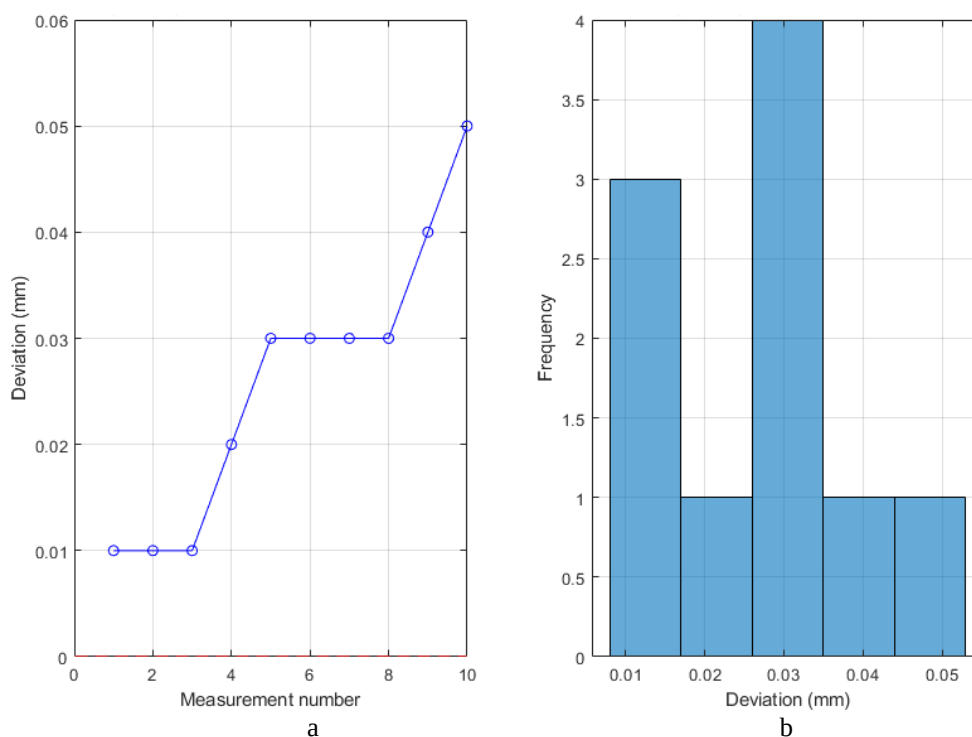


Fig. 8 – Deviations of the actual clearance in Group 4 (25 mm)

Histograms and graphs of deviations show that the deviations are mostly positive (the actual clearance is larger than the nominal) in all groups. This confirms the general conclusion about the systematic excess of the

actual clearance over the nominal. Group 1 (16 mm) demonstrates the largest scatter of deviations and a tendency for the deviation to increase with the growth of the nominal clearance.

The study showed that the actual radial clearance in the joints of tubes with tubesheets, as a rule, exceeds the nominal value. The largest deviations and scatter of values are observed for tubes of the smallest diameter (16 mm). A statistically significant difference between the average actual clearance and the nominal clearance was confirmed only for this group. The results obtained can be used to clarify the tolerances for the manufacture and assembly of tubular joints of heat exchange equipment, as well as to develop recommendations for quality control of joints, which will improve the reliability and durability of heat exchangers.

Determination of Residual Stresses by the Stress Relief Method. In this part of the work, to determine the residual stresses, the mechanical stress relief method was used, which consists in measuring the change in the geometric dimensions of the sample after stress relief by cutting. The scheme for implementing the method is shown in Figure 9.

To estimate the residual stresses, the following formula is used

$$\sigma = \frac{E \cdot \Delta L}{L}, \quad (6)$$

where: σ – is the residual stress (MPa), E – is the modulus of elasticity of the tube material (for steel 20: $E = 2.1 \times 10^5$ MPa), ΔL – is the change in the width of the joint after cutting (mm), L – is the initial width (in this case, the diameter of the hole before cutting, mm).

Calculation Results

Based on the data provided, the residual stresses were calculated for tubes with diameters of 16 mm, 19 mm, 20 mm, and 25 mm at various values of the nominal and actual clearances. The calculation results are presented in Tables 8-11.

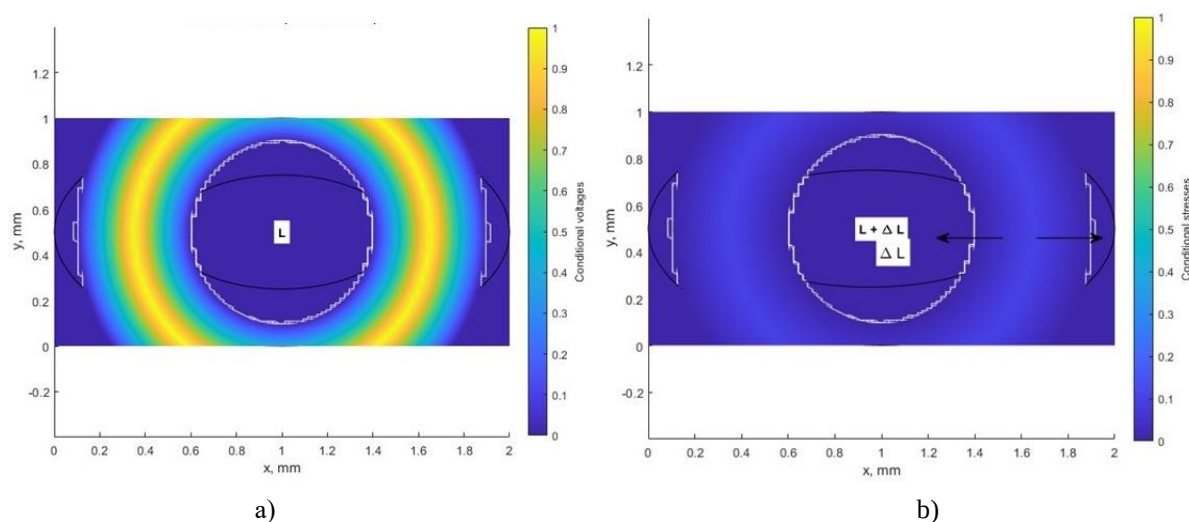


Fig. 9 – Scheme of residual stress distribution in the rolled «tube-tubesheet» joint before and after mechanical stress relief

Table 8

Residual stresses in tubes Ø16 mm depending on the clearance

No.	Nominal Clearance (mm)	Actual Clearance (mm)	Hole Diameter (mm)	Residual Stress (MPa)
1.1	0.05	0.11	16.06	71.90
1.2	0.10	0.10	16.12	65.15
1.3	0.15	0.15	16.18	97.35
1.4	0.20	0.26	16.24	168.10
1.5	0.25	0.31	16.30	199.70
1.6	0.30	0.35	16.36	224.65
1.7	0.35	0.42	16.42	268.55
1.8	0.40	0.51	16.48	324.95
1.9	0.45	0.56	16.52	340.95
1.10	0.50	0.56	16.53	355.70

Table 9

Residual stresses in tubes Ø19 mm depending on the clearance

No.	Nominal Clearance (mm)	Actual Clearance (mm)	Hole Diameter (mm)	Residual Stress (MPa)
1	0.05	0.07	19.04	38.60
2	0.10	0.10	19.12	54.90
3	0.15	0.14	19.17	76.70
4	0.20	0.23	19.21	125.70
5	0.25	0.28	19.27	152.50
6	0.30	0.31	19.30	168.65
7	0.35	0.36	19.36	195.25
8	0.40	0.43	19.40	232.75
9	0.45	0.47	19.43	254.00
10	0.50	0.54	19.51	290.60

Table 10

Residual stresses in tubes Ø20 mm depending on the clearance

No.	Nominal Clearance (mm)	Actual Clearance (mm)	Hole Diameter (mm)	Residual Stress (MPa)
1	0.05	0.09	20.04	47.15
2	0.10	0.12	20.09	62.70
3	0.15	0.17	20.15	88.60
4	0.20	0.23	20.19	119.60
5	0.25	0.26	20.21	135.10
6	0.30	0.32	20.29	165.60
7	0.35	0.37	20.38	190.65
8	0.40	0.42	20.39	216.30
9	0.45	0.44	20.40	226.45
10	0.50	0.53	20.55	270.80

Table 11

Residual stresses in tubes Ø25 mm depending on the clearance

No.	Nominal Clearance (mm)	Actual Clearance (mm)	Hole Diameter (mm)	Residual Stress (MPa)
1	0.05	0.06	25.01	25.20
2	0.10	0.11	25.13	45.95
3	0.15	0.16	25.19	66.70
4	0.20	0.22	25.20	91.65
5	0.25	0.28	25.27	116.35
6	0.30	0.33	25.34	136.75
7	0.35	0.38	25.38	157.20
8	0.40	0.43	25.40	177.75
9	0.45	0.49	25.45	202.15
10	0.50	0.55	25.52	226.30

Studies of rolling joints of «heat exchange tube-tubesheet» for a pipe with a diameter of 16 mm revealed a direct relationship between the clearance value and the level of residual stresses. It was found that when the clearance exceeds 0.30 mm, critical residual stresses are formed in the material, which can negatively affect the durability and reliability of the joint. The greatest risks are observed at clearances of 0.35 mm and higher, where residual stresses reach ultimate values exceeding 250.0 MPa. Such stresses are comparable to the ultimate strength of many structural steels, which can lead to local plastic deformation, crack formation, or a decrease in the fatigue resistance of the assembly. The data obtained emphasize the need for strict control of the geometric parameters of the joint at the design and installation stage to minimize

operational risks.

Studies of the dependence of residual stresses on the clearance value in the «heat exchange tube-tubesheet» joint after rolling for tubes with diameters of 19 and 20 mm revealed the following patterns. At a minimum clearance of 0.05 mm, the stresses generated are insufficient to ensure the required joint strength, which is associated with limited plastic deformation of the material and weak contact interaction of the surfaces. Increasing the clearance to 0.40 mm or more leads to the achievement of critical stresses, at which local overstress zones are observed, capable of initiating fatigue cracks or plastic deformation in the boundary layers. Maximum (ultimate) stresses occur at clearances of the order of 0.50 mm, which corresponds to the transition of the material to a state of saturation of strain

hardening, after which a further increase in the clearance does not lead to an increase in the bearing capacity of the joint, but only increases the risk of brittle fracture. These results emphasize the need for strict control of the geometric parameters of the joint at the assembly stage to optimize residual stresses and ensure the durability of the structure.

When analyzing the dependence of residual stresses on the clearance value in the joint of a heat exchange tube and a tubesheet, three key modes are distinguished. At a minimum clearance of 0.15 mm, insufficient stresses are observed, which leads to a decrease in the joint strength due to insufficient plastic deformation of the material. This can cause a weakening of the contact and a violation of the tightness under operating loads.

When the clearance is increased to 0.45 mm or more, critical stresses arise, close to the yield strength of the material. In this range, the availability of the joint is maintained, but the risk of local plastic deformation increases sharply, which requires additional checks for fatigue life.

Clearances of 0.50 mm correspond to the ultimate stresses at which the material passes into the zone of uncontrolled destruction. Such parameters make the connection unsuitable for operation due to the high probability of cracks, delamination, or complete softening of the metal structure in the contact zone.

The results of the calculations show that the value of residual stresses in rolled joints directly depends on the size of the gap between the pipe and the hole in the tubesheet.

The following main patterns can be distinguished:

Small clearances (0.05-0.15 mm): At minimum clearances, residual stresses are relatively small. This is due to the fact that during rolling, the elastic deformation of the pipe material mainly occurs, and the plastic deformation required to create a reliable connection is insufficient.

Medium clearances (0.15-0.40 mm): As the clearance increases, residual stresses increase. This is explained by an increase in the degree of plastic deformation of the pipe material during rolling. In this range of clearances, the optimal ratio between the joint strength and the level of residual stresses is achieved.

Large clearances (more than 0.40 mm): At large clearances, residual stresses reach critical values close to the yield strength of the material (for steel 20, the yield strength is about 250 MPa). This can lead to the formation of microcracks, a decrease in fatigue strength, and premature failure of the joint. This is especially critical for smaller diameter pipes (16 mm).

To visualize the dependence of residual stresses on the actual clearance for pipes of different diameters, graphs were constructed (Fig. 10).

The graphs show that for all pipe diameters there is a tendency for residual stresses to increase with increasing clearance. It can also be seen that for pipes of smaller diameter (16 mm), critical stress values are achieved at smaller clearances.

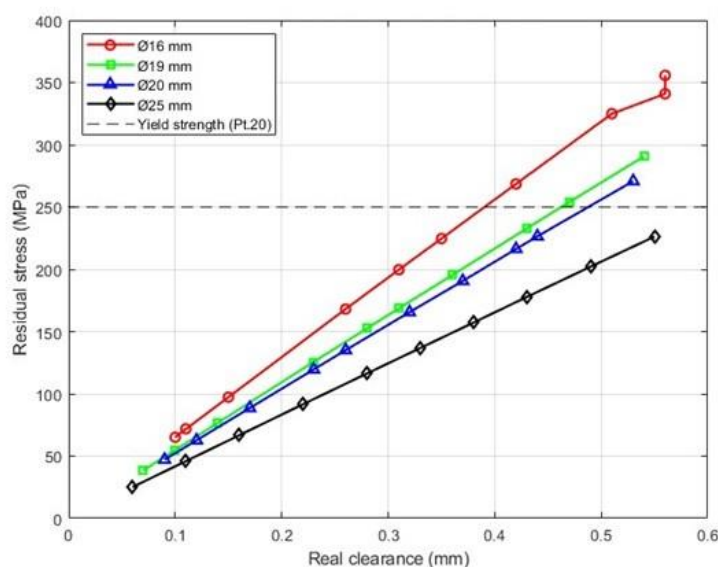


Fig. 10 – Dependence of residual stresses on the actual clearance for pipes of different diameters

Discussion

Research builds upon the work of Bouzid and Pourreza, Sharma et al. by confirming key trends in the relationship between clearance and residual stresses in tube-to-tubesheet joints [6, 19]. Importantly, the study extends these findings by providing new insights into the behavior of small diameter tubes, an area that has received less

attention in previous research. Yoganathan et al. and Boulougouras and Besseris observed a linear increase in residual contact pressure with increasing clearance for strain-hardening materials, a finding that is corroborated by our experimental data [4, 10]. Specifically, for 16 mm diameter tubes, we observed a similar trend, with residual stresses increasing proportionally with clearance until reaching a

critical threshold around 0.40 mm. At this point, the residual stresses reach critical values, potentially causing local plastic deformation and reducing the fatigue strength of the joint. This observation is particularly crucial for small diameter tubes, where slight deviations can significantly impact the joint's reliability.

Results indicate an optimal clearance range of 0.10–0.30 mm, aligning with the recommendations of Shuaib et al. [20]. However, for larger diameter tubes (e.g., 25 mm), this range could be slightly extended to 0.15–0.35 mm, as the larger tube size provides better resistance to geometric changes during rolling. Abubakar et al. demonstrated that for plastically deformable materials (with high tangent modulus of plasticity, E_t), increasing clearance enhances contact pressure due to the tube material's resistance to reverse bending [13]. Our experimental data show a similar trend: for tubes with $E_t = 0.8$ GPa, residual stresses increased with clearance until reaching a critical level, after which a sharp decline occurred due to insufficient tube wall deformation.

At minimal clearances, residual stresses remain relatively low due to the predominance of elastic deformation in the tube material. This aligns with the findings of Yoganathan et al., who noted that such clearances are insufficient for creating a reliable joint [4]. For small diameter tubes (16 mm), this clearance range is ineffective as it fails to provide adequate contact pressure. This range proves optimal for most tube diameters investigated. Specifically, for tubes with diameters of 19, 20, and 25 mm, medium clearances offer a balance between joint strength and acceptable residual stress levels. Our data confirm that for tubes with moderate plastic deformation ($E_t = 0.8$ GPa), maximum strength is achieved within this range.

With large clearances, residual stresses reach critical values, exceeding 70% of the material's yield strength. This agrees with Smith and Johnson, who observed that such clearances can lead to microcracks and reduced joint longevity [17]. The situation is particularly critical for small diameter tubes (16 mm), where even a slight increase in clearance can significantly impact reliability. Our results emphasize the importance of strictly controlling actual clearances during manufacturing. For small diameter tubes (16 mm), high-precision measuring tools, such as micrometers with ± 0.01 mm accuracy, are recommended to minimize deviations from nominal values.

Choosing tube materials with a high tangent modulus of plasticity (E_t) can significantly enhance joint strength due to their resistance to reverse bending of the tubesheet material. This aligns with the findings of Singh, who showed that material with $E_t = 1.2$ GPa provides higher strength under the same deformation conditions [21]

Conclusions

Analysis of residual stresses in the "heat exchange tube - tubesheet" joint showed that the gap between the tube and the hole plays a key role in the formation of the strength and reliability of the joint. At small clearances, of

the order of 0.05 mm, insufficient stresses are observed, which can lead to a weakening of the tube fit in the tubesheet and a decrease in the tightness of the connection. As the clearance increases, the stresses increase, reaching the optimal range within 0.10–0.30 mm, where reliable fixation of the tube during rolling is ensured. However, a further increase in the clearance leads to a sharp increase in residual stresses, which can lead to local destruction of the material, the formation of cracks, and a decrease in the service life of the structure.

Stresses become especially critical at clearances of 0.40 mm and higher. In these conditions, the joint is subjected to significant mechanical loads, which can cause a violation of the integrity of both the pipe and the tubesheet. Upon reaching the limit values typical for clearances of 0.45–0.50 mm, the stresses become so high that the risk of joint destruction increases even with minor fluctuations in operating parameters.

Thus, the results of the study allow us to determine a safe range of clearances at which the strength, tightness, and durability of the joint are ensured. Optimal rolling parameters ensure efficient distribution of residual stresses, preventing excessive weakening or, conversely, critical overload of the joint.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to LLC «Ukrenergochormet Plant», Dnipro, for providing the opportunity to conduct the experimental part of this study at their facility.

References

- [1] W.D. Callister Jr., and D.G. Rethwisch, *Materials science and engineering: An introduction*, 10th ed. Wiley, 2018.
- [2] A. Al-Odhaib, and A. Abdulaziz, «Review on heat exchanger tube-to-tubesheet joining», *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, vol. 11(12), pp. 1395–1405, 2020. doi: **10.34218/IJARET.11.10.2020.133**.
- [3] M.P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. Wiley and Sons, Incorporated, John, 2019.
- [4] R. Yoganathan, N.S. Shanmugam, and A. Ramanathan, «Effects of thickness offset on the tube-to-tube sheet expansion joint strength: An experimental evaluation», *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, pp. 2770–2782, 2022. doi: **10.1007/s11665-021-06400-0**.
- [5] P.R. Roberge, «Corrosion monitoring», in *Uhlig's corrosion handbook*, R.W. Revie, Ed., John Wiley and Sons, Inc., 2011, ch. 87, pp. 1179–1201. doi: **10.1002/9780470872864.ch87**.
- [6] S.K. Sharma, B.K. Mishra, and I.V. Singh, «A multi-objective optimization framework based on FEA, ANN, and NSGA-II to optimize the process parameters of tube-to-tubesheet joint», *Finite Elements in*

- Analysis and Design*, vol. 241, article 104225, 2024. doi: [10.1016/j.fincl.2024.104225](https://doi.org/10.1016/j.fincl.2024.104225).
- [7] K. Thulukkanam, «Material selection and fabrication», in *Heat exchangers*, CRC Press. Publ., 2024, pp. 135-336. doi: [10.1201/9781003352051-2](https://doi.org/10.1201/9781003352051-2).
- [8] W. Gissler and H. A. Jehn, Eds. *Advanced techniques for surface engineering*. Springer Netherlands, 1992. doi: [10.1007/978-94-017-0631-5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0631-5).
- [9] R.G. Budynas, and J.K. Nisbett, *Mechanical engineering design*, 11th ed. McGraw-Hill Education, 2020.
- [10] P. Boulougouras, and G. Besseris, «Lean-and-green strength performance optimization of a tube-to-tubesheet joint for a shell-and-tube heat exchanger using Taguchi methods and random forests», *Processes*, vol. 11(4), article 1211, 2023. doi: [10.3390/pr11041211](https://doi.org/10.3390/pr11041211).
- [11] O.V. Stovpnyk, and V.O. Kyrylyuk, «Evaluation of the Efficiency of Methods for Expanding Thick-Walled Tubes into Tube Sheets of Heat Exchangers», *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnyk of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, vol. 5(285), pp. 16-23, 2024. doi: [10.33216/1998-7927-2024-285-5-16-23](https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-16-23).
- [12] G.S. Schajer, and C.O. Ruud, «Overview of residual stresses and their measurement», in *Practical residual stress measurement methods*, John Wiley and Sons, Ltd, 2013, pp. 1-27. doi: [10.1002/9781118402832.ch1](https://doi.org/10.1002/9781118402832.ch1).
- [13] S.A. Abubakar, S. Mori, and J. Sumner, «A review of factors affecting SCC initiation and propagation in pipeline carbon steels», *Metals*, vol. 12(8), article 1397, 2022. doi: [10.3390/met12081397](https://doi.org/10.3390/met12081397).
- [14] X. Li et al., «Research progress of residual stress measurement methods», *Heliyon*, vol. 10(7), article e28348, 2024. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e28348](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348).
- [15] A. Tabatabaeian, A.R. Ghasemi, M.M. Shokrieh, B. Marzbanrad, M. Baraheni, and M. Fotouhi, «Residual stress in engineering materials: A review», *Advanced Engineering Materials*, vol. 24(3), article 2100786, 2021. doi: [10.1002/adem.202100786](https://doi.org/10.1002/adem.202100786).
- [16] K. Ebrahimi, and S. Rahimi Mofrad, «Pneumatic test of pressurised equipment: Its hazards and alternatives», in *Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*, Prague, Czech Republic, 2018, pp. 1-10. doi: [10.1115/pvp2018-84025](https://doi.org/10.1115/pvp2018-84025).
- [17] J. Smith, and A. Johnson, «Residual stresses and fatigue performance of tubular joints», *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 15(3), pp. 42-58, 2019.
- [18] J. Václavík, O. Weinberg, P. Bohdan, J. Jankovec, and S. Holý, «Evaluation of residual stresses using ring core method», in *Proceedings of the 14th International Conference on Experimental Mechanics*, Poitiers, France, 2010, vol. 6. doi: [10.1051/epjconf/20100644004](https://doi.org/10.1051/epjconf/20100644004).
- [19] A.-H. Bouzid, and M. Pourreza, «Analysis of residual stresses in the transition zone of tube-to-tubesheet joints», *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 141(4), article 041201, 2019. doi: [10.1115/1.4043374](https://doi.org/10.1115/1.4043374).
- [20] A.N. Shuaib, O.M. Duffuaa, N. Merah, and Y. Al-Nassar, «Effects of initial tube-tubesheet clearance and grooves on axial and hoop residual stresses of roller expanded joints», in *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference*, Bellevue, Washington, USA, 2010, vol. 4, pp. 1-12. doi: [10.1115/PVP2010-26156](https://doi.org/10.1115/PVP2010-26156).
- [21] R.J. Singh, K.N. Jonnalagadda, P.J. Guruprasad, A.K. Metya, and H.S. Kushwaha, «Effect of constitutive model on residual stress development in the pressure tube rolled joint», *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 190, article 104318, 2021. doi: [10.1016/j.ijpvp.2021.104318](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104318).

ВПЛИВ ЗАЗОРУ НА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ТА ЯКІСТЬ ВАЛЬЦЬОВАНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБА-ТРУБНА ДОШКА

Стовпник О.В.	канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4391-6644 , e-mail: o.v.stovpnyk@ust.edu.ua ;
Кабат О.С.	д-р техн. наук, професор, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7995-5333 , e-mail: o.s.kabat@ust.edu.ua ;
Ведь В.В.	ст. викладач, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2391-6463 , e-mail: v.v.ved@ust.edu.ua

Якість з'єднання труба-трубна дошка відіграє ключову роль у забезпеченні надійності та довговічності теплообмінників і іншого промислового обладнання, що працює в складних експлуатаційних умовах. У даній статті досліджено вплив величини зазору між зовнішньою поверхнею труби та отвором у трубній дошці на рівень залишкових напружень у з'єднанні після процесу вальцювання. Експериментальна частина роботи включала ретельні вимірювання фактичних зазорів за допомогою спеціалізованого обладнання, розрахунок залишкових напружень методом механічного зняття напружень, а також детальний статистичний аналіз отриманих даних для

підтвердження їх точності та достовірності. Результати дослідження показали, що фактичний зазор у більшості випадків перевищує номінальне значення, визначене проєктними стандартами, а його зростання призводить до суттєвого збільшення залишкових напружень у з'єднанні. Найвищі напруження фіксувалися при зазорах від 0,40 мм і більше, що може спричинити локальну пластичну деформацію, негативно впливаючи на структурну цілісність і знижуючи втомну міцність з'єднання протягом тривалого часу. Оптимальний діапазон зазорів, який забезпечує баланс між надійністю з'єднання та допустимим рівнем напружень, встановлено в межах 0,10-0,30 мм, що дозволяє знизити ризик передчасного руйнування. Для перевірки достовірності даних використано сучасні методи статистичного аналізу, зокрема обчислення стандартного відхилення для оцінки розкиду результатів і t-критерій Стюдента для визначення статистичної значущості виявлених закономірностей. Розрахунки підтвердили тісний зв'язок між величиною зазору та рівнем залишкових напружень, особливо для труб малого діаметра, де точність допусків має вирішальне значення. Отримані результати можуть бути застосовані під час проєктування та виробництва кожухотрубних теплообмінників, сприяючи оптимізації параметрів з'єднань, підвищенню ефективності роботи обладнання та подовженню терміну його служби. У статті також наведено практичні рекомендації щодо контролю якості, включаючи високоточні методи вимірювання зазорів і оцінки залишкових напружень на етапах виробництва та технічного обслуговування.

Ключові слова: вальцювання, залишкові напруження, зазор, контроль якості, параметри процесу, надійність, довговічність.

Перелік використаних джерел

- [1] Callister W.D. Jr., Rethwisch D.G. Materials science and engineering: An introduction. 10th ed. Wiley. 2018. 962 p.
- [2] Al-Odhaib A., Abdulaziz A. Review on heat exchanger tube-to-tubesheet joining. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2020. Vol. 11(12). Pp. 1395-1405. DOI: <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.10.2020.133>.
- [3] Groover M.P. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. Wiley and Sons, Incorporated, John, 2019. 816 p.
- [4] Yoganathan R., Shanmugam N.S., Ramanathan A. Effects of thickness offset on the tube-to-tube sheet expansion joint strength: An experimental evaluation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. Pp. 2770-2782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06400-0>.
- [5] Roberge P.R. Corrosion monitoring. *Uhlig's corrosion handbook* / ed. by R.W. Revie. John Wiley and Sons, Inc., 2011. Pp. 1179-1201. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470872864.ch87>.
- [6] Sharma S.K., Mishra B.K., Singh I.V. A multiobjective optimization framework based on FEA, ANN, and NSGA-II to optimize the process parameters of tube-to-tubesheet joint. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2024. Vol. 241. Article 104225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2024.104225>.
- [7] Thulukkanam K. Material selection and fabrication. *Heat exchangers*. CRC Press, 2024. Pp. 135-336. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003352051-2>.
- [8] Advanced techniques for surface engineering / ed. by W. Gissler, H.A. Jehn. Springer Netherlands, 1992. 402 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0631-5>.
- [9] Budynas R.G., Nisbett J.K. Mechanical engineering design. 11th ed. McGraw-Hill Education, 2020. 1116 p.
- [10] Boulougouras P., Besseris G. Lean-and-green strength performance optimization of a tube-to-tubesheet joint for a shell-and-tube heat exchanger using Taguchi methods and random forests. *Processes*. 2023. Vol. 11(4). Article 1211. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11041211>.
- [11] Стовпник О.В., Кирилюк В.О. Evaluation of the efficiency of methods for expanding thick-walled tubes into tube sheets of heat exchangers. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2024. Вип. 5(285). С. 16-23. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-16-23>.
- [12] Schajer G.S., Ruud C.O. Overview of residual stresses and their measurement. *Practical residual stress measurement methods*. John Wiley and Sons, Ltd, 2013. Pp. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118402832.ch1>.
- [13] Abubakar S.A., Mori S., Sumner J. A review of factors affecting SCC initiation and propagation in pipeline carbon steels. *Metals*. 2022. Vol. 12(8). Article 1397. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12081397>.
- [14] Research progress of residual stress measurement methods / X. Li et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(7). Article e28348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348>.
- [15] Residual stress in engineering materials: A review / A. Tabatabaeian et al. *Advanced Engineering Materials*. 2021. Vol. 24, iss. 3. Article 2100786. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202100786>.
- [16] Ebrahimi K., Rahimi Mofrad S. Pneumatic test of pressurised equipment: Its hazards and alternatives. *ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*, Prague, Czech Republic, 15-20 July 2018. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1115/pvp2018-84025>.
- [17] Smith J., Johnson A. Residual stresses and fatigue performance of tubular joints. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 15(3). Pp. 42-58.
- [18] Evaluation of residual stresses using ring core method / J. Václavík et al. *Proceedings of the 14th*

International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers, France, 4-9 July 2010, vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100644004>.

- [19] Bouzid A.-H., Pourreza M. Analysis of residual stresses in the transition zone of tube-to-tubesheet joints. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2019. Vol. 141(4). Article 041201. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043374>.

- [20] Effects of initial tube-tubesheet clearance and grooves on axial and hoop residual stresses of roller expanded joints / A.N. Shuaib et al. *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP*

Conference, Bellevue, Washington, USA, 18-22 July 2010. Vol. 4. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2010-26156>.

- [21] Effect of constitutive model on residual stress development in the pressure tube rolled joint / R.J. Singh et al. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021. Vol. 190. Article 104318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104318>.

Стаття надійшла 11.04.2025

Стаття прийнята 24.04.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Stovpnyk O.V., Kabat O.S., Ved' V.V. Effect of clearance on residual stress and quality in rolled tube-tubesheet connections. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 61-75. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336269>.

УДК 621.9.048.3

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336270

ДО ПИТАННЯ ЩОДО ВИНИКНЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ РІЗЦЯ
МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ

Карпенко Т.М.

канд. фіз.-мат. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4042-0301>, e-mail: karpenko_t_n@pstu.edu;

Шишкін В.В.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-2180>, e-mail: shishkin_v_v@pstu.edu

Для сучасного машинобудування важливим є питання міцності та вібростійкості різних частин системи: верстат, пристосування, інструмент, заготовка. Зокрема, враховуючи різновидність інструментів, які застосовуються при точінні, актуальним є узгодження параметрів різця та режиму різання, що забезпечать відсутність автоколивань. До тих пір, поки рух різця токарного верстату розглядався як рух тіла з одним ступенем вільності, не було пояснень автоколивання цього різця. В даній роботі виникнення цих коливань пояснюється теорією Тлустого – Кудинова. Різець замінюється динамічною моделлю, що має два ступеня вільності, пружні властивості якої еквівалентні властивостям двох взаємно перпендикулярних пружин, розташованих по головних осях жорсткості. Сила різання вважається лінійно залежною від товщини стружки, що знімається, коефіцієнт пропорційності – коефіцієнт питомого опору різанню. За допомогою рівнянь Лагранжу другого роду складені диференціальні рівняння руху різця, за узагальнені координати вибрані координати центру ваги різця вздовж головних осей жорсткості. При знаходженні розв'язку диференціальних рівнянь руху отримано характеристичне квадратне рівняння. По знаку дискримінанта цього рівняння з'ясована можливість виникнення автоколивань різця. Наведена блок-схема алгоритму розрахунків для визначення стійкого процесу різання при точінні. Розглянуто приклад чорнового поздовжнього точіння заготовки проходними розточними різцями з пластинами. Оброблювальний матеріал – конструкційна сталь. Подача і глибина різання змінювались. Викладена в роботі методика підбору сукупності параметрів технологічного процесу, при яких автоколивання інструменту відсутні, може бути корисною для студентів ЗВО, аспірантів і інженерів, що займаються конструюванням і експлуатацією токарних верстатів.

Ключові слова: вібростійкість різця, головні осі жорсткості, теорія координатних в'язей, алгоритм.

Постановка проблеми

Серед питань міцності та вібростійкості системи: токарний верстат – пристрій – інструмент – заготовка, особливе місце займає питання виникнення автоколивань різця згідно теорії координатних в'язей Тлустого – Кудинова.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Теоретичне обґрунтування виникнення коливань різця металорізального верстату, які спираються на залежності сили різання від пружних переміщень різця відносно заготовки, викладені в роботах [1-3]. В роботах [4-6] містяться методики визначення власних частот коливань різця в залежності від його геометричних параметрів; в роботі [4] розроблена трьохмірна математична модель, яка враховує складність геометричної форми різця. Автори статей [7-9] запропонували конструкції вібростійкої інструментальної системи для обробки отворів великих діаметрів на токарних верстаках. Результати експериментального дослідження автоколивань при точінні з метою визначення впливу зносу різця на параметри його пружного переміщення представлені в роботах [10-16]. Аналіз публікацій свідчить, зокрема про відсутність практичних рекомендацій щодо забезпечення стійкого режиму різання без автоколивань інструменту.

Мета статті

Скориставшись теорією Тлустого – Кудинова запропонувати і реалізувати на практиці алгоритм дій щодо підбору сукупності конструктивних параметрів різця і режимних параметрів процесу точіння, при яких автоколивання інструменту не виникають.

Виклад основного матеріалу

З точки зору пружних властивостей різця його кріплення замінюється двома взаємно перпендикулярними пружинами (Рис. 1), які розташовані по головних осях жорсткості.

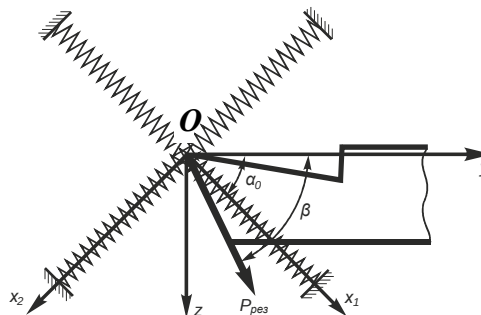


Рис. 1 – Розрахункова схема

Як відомо, якщо позначити головні осі жорсткості Ox_1 та Ox_2 , то пружна сила, що діє вздовж осі Ox_2 , не створює пружних переміщень по осі Ox_1 і навпаки. Пружні сили вздовж цих осей дорівнюють:

$$P_{x1} = c_{x1} \cdot x_1 \text{ і } P_{x2} = c_{x2} \cdot x_2. \quad (1)$$

Згідно теорії Тлустого-Кудинова, коливання різця розглядаються як коливання механічної системи з двома ступенями вільності.

Податливості вздовж головних осей жорсткості зв'язані з податливостями пружного кріплення вздовж довільних осей Oy та Oz , α_{yy} , α_{yz} , α_{zz} , розраховуються за допомогою формул:

$$\frac{1}{c_{x1}} = \frac{1}{2} \cdot \left[\alpha_{yy} + \alpha_{zz} - \sqrt{(\alpha_{yy} - \alpha_{zz})^2 + 4 \cdot \alpha_{yz}^2} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{1}{c_{x2}} = \frac{1}{2} \cdot \left[\alpha_{yy} + \alpha_{zz} + \sqrt{(\alpha_{yy} - \alpha_{zz})^2 + 4 \cdot \alpha_{yz}^2} \right]; \quad (3)$$

де, наприклад, α_{yz} – прогин в напрямку осі Oy під дією одиничної сили, що діє в напрямку осі Oz .

Положення головних осей жорсткості характеризується кутом α_0 , який дорівнює

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \cdot \arctg \frac{2 \cdot \alpha_{yz}}{\alpha_{yy} - \alpha_{zz}}. \quad (4)$$

Величину цього кута можна визначити також за допомогою круга Мора.

Для складання диференціальних рівнянь руху різця в процесі різання за узагальнені координати вибираємо координати точки C – центру ваги різця вздовж осей Ox_1x_2 .

За початок координат вибираємо вершину різця. Вісь Oy спрямовуємо по нормалі до оброблюваної поверхні заготовки, вісь Oz – перпендикулярно до Oy . Сила різання P_{pz} створює кут β з віссю Oy .

Кінетична енергія різця, маса якого m , дорівнює

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2). \quad (5)$$

Враховуючи спосіб кріплення різця, маємо формулу для потенціальної енергії пружних деформацій

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot (c_{x1} \cdot x_1^2 + c_{x2} \cdot x_2^2). \quad (6)$$

Рівняння Лагранжу другого роду мають вигляд

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} + Q_i^{(pez)}, \quad i=1, 2 \quad (7)$$

де $Q_i^{(pez)}$ – узагальнені сили різання, що відповідають координатам x_1 та x_2 .

Для визначення узагальнених сил різання скористаємось величиною можливої роботи, яку виконує сила різання, якщо в довільному положенні різця надати йому можливі переміщення δx_1 та δx_2 :

$$\sum \delta A(P_{pez}) = P_{pez} \cdot \cos(\beta - \alpha_0) \cdot \delta x_1 + P_{pez} \cdot \sin(\beta - \alpha_0) \cdot \delta x_2 \quad (8)$$

Будемо вважати, що сила різання лінійно залежить від миттєвого значення товщини стружки y , тобто

$$P_{pez} = P_0 - r \cdot y, \quad (9)$$

де P_0 – значення сили різання при усталеному режимі різання без коливань;

r – коефіцієнт питомого опору різанню, який дорівнює зміні сили різання при збільшенні товщини стружки на 1 мм.

Будемо визначати сили Q_{x1} та Q_{x2} , які відповідають змінній складовій сили різання $(-r \cdot y)$. Для цього виразимо координату y центру ваги різця через координати $x_c = x_1$, $y_c = y_1$, скориставшись рисунком 2.

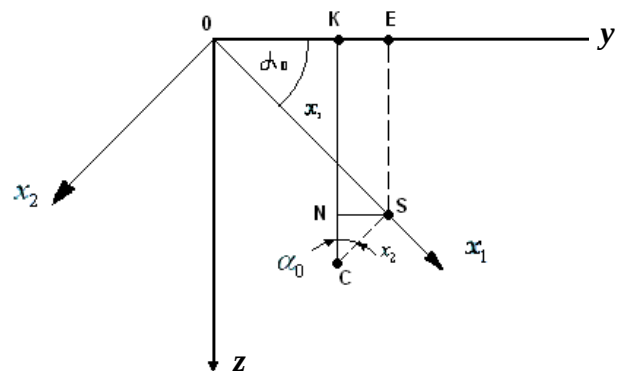


Рис. 2 – Залежність між координатами точки C

Маємо

$$y = x_1 \cdot \cos \alpha_0 - x_2 \cdot \sin \alpha_0. \quad (10)$$

Тоді

$$\sum \delta A(P_{рез}) = -r \cdot (x_1 \cos \alpha_0 - x_2 \sin \alpha_0) \cdot \cos(\beta - \alpha_0) \cdot \delta x_1 - r \cdot (x_1 \cos \alpha_0 - x_2 \sin \alpha_0) \cdot \sin(\beta - \alpha_0) \cdot \delta x_2. \quad (11)$$

Тобто узагальнені сили дорівнюють:

$$Q_{x1} = -r \cdot \cos \alpha_0 \cdot \cos(\beta - \alpha_0) \cdot x_1 + r \cdot \sin \alpha_0 \cos(\beta - \alpha_0) \cdot x_2; \quad (12)$$

$$Q_{x2} = -r \cdot \cos \alpha_0 \cdot \sin(\beta - \alpha_0) \cdot x_1 + r \cdot \sin \alpha_0 \sin(\beta - \alpha_0) \cdot x_2. \quad (13)$$

Враховуючи формули кінетичної і потенціальної енергій

$$T = \frac{1}{2} \cdot (a_{11} \cdot \dot{q}_1^2 + 2 \cdot a_{12} \cdot \dot{q}_1 \cdot \dot{q}_2 + a_{22} \cdot \dot{q}_2^2), \quad (14)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot (c_{11} \cdot q_1^2 + 2 \cdot c_{12} \cdot q_1 \cdot q_2 + c_{22} \cdot q_2^2)$$

маємо коефіцієнти інерції a_{ij} та жорсткості c_{ij} :

$$a_{11} = m, \quad a_{12} = 0, \quad a_{22} = m, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{x1} + r \cdot \cos(\beta - \alpha_0) \cdot \cos \alpha_0 \\ c_{12} &= -r \cdot \sin \alpha_0 \cdot \cos(\beta - \alpha_0) \\ c_{21} &= r \cdot \cos \alpha_0 \cdot \sin(\beta - \alpha_0) \\ c_{22} &= c_{x2} - r \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin(\beta - \alpha_0) \end{aligned} \quad (16)$$

Таким чином, диференціальні рівняння руху (7) матимуть вигляд:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot \ddot{x}_1 + c_{11} \cdot x_1 + c_{12} \cdot x_2 = 0 \\ c_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot \ddot{x}_2 + c_{22} \cdot x_2 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Розв'язок цих рівнянь шукаємо у вигляді

$$x_1 = A_1 \cdot e^{\lambda t}, \quad x_2 = A_2 \cdot e^{\lambda t}. \quad (18)$$

Після підстановки (18) в (17) отримаємо систему алгебраїчних рівнянь відносно A_1 та A_2 :

$$\begin{cases} (c_{11} + a_{11} \cdot \lambda^2) \cdot A_1 + c_{12} \cdot A_2 = 0 \\ c_{21} \cdot A_1 + (c_{22} + a_{22} \cdot \lambda^2) \cdot A_2 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Система (19) має нульовий розв'язок, якщо її визначник дорівнює нулеві, тобто маємо:

$$(c_{11} + a_{11} \cdot \lambda^2) \cdot (c_{22} + a_{22} \cdot \lambda^2) - c_{12} \cdot c_{21} = 0. \quad (20)$$

З цього бікватратного характеристичного рівняння визначають величини λ , які дозволяють дослідити процес стійкості процесу різання.

Позначивши $u = \lambda^2$, замість рівняння (20) маємо квадратне рівняння

$$a_{11} \cdot a_{22} \cdot u^2 + (c_{11} \cdot a_{22} + c_{22} \cdot a_{11}) \cdot u + (c_{11} \cdot c_{22} - c_{12} \cdot c_{21}) = 0 \quad (21)$$

Дискримінант цього рівняння дорівнює

$$D = (c_{11} \cdot a_{22} + c_{22} \cdot a_{11})^2 - 4 \cdot a_{11} \cdot a_{22} \cdot (c_{11} \cdot c_{22} - c_{12} \cdot c_{21}) \quad (22)$$

В залежності від знаку дискримінанту мають місце наступні випадки.

1) Корені рівняння (21) дійсні від'ємні, якщо $D \geq 0$. Тоді всі λ – уявні, тобто розв'язок рівнянь (17) виражається через тригонометричні функції; маємо гармонічний рух.

2) У випадку, коли $D < 0$, корені рівняння (21) – комплексні. Серед чотирьох коренів λ знайдуться два з додатною дійсною частиною, а тому амплітуди руху будуть зростати. Це означає, що усталений режим різання буде нестійким, а тому при випадковому малому відхиленні різця від положення рівноваги різець не повернеться у вихідне положення.

В реальній системі при деякій амплітуді коливання різця не будуть зростати і встановиться автоколивний процес.

Можна перекоонатись в тому, що траєкторією вершини різця, буде еліпс (Рис. 3). Оскільки складові сили різання вздовж осей Ox_1 і Ox_2 дорівнюють

$$c_{x1} \cdot x_1 = P_{pi3} \cdot \cos(\beta - \alpha_0), \quad (23)$$

$$c_{x2} \cdot x_2 = P_{pi3} \cdot \sin(\beta - \alpha_0), \quad (24)$$

маємо рівняння еліпсу:

$$\left(\frac{x_1}{\frac{P_{pi3}}{c_{x1}}} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{\frac{P_{pi3}}{c_{x2}}} \right)^2 = 1. \quad (25)$$

Обґрунтування виникнення автоколивань різця, запропоноване Іржі Тлустим та В.О. Кудиновим [1, 4], міститься у наступному.

Під час одного повного циклу обробки деталі сила різання виконує певну додатну роботу, яка підтримує автоколивання. Це відбувається тому, що при

коливання різця робота сили різання на частині траєкторії $B-n-A$ (Рис. 3) є додатною і більшою, ніж робота тієї ж сили на частині траєкторії $A-m-B$, котра є від'ємною.

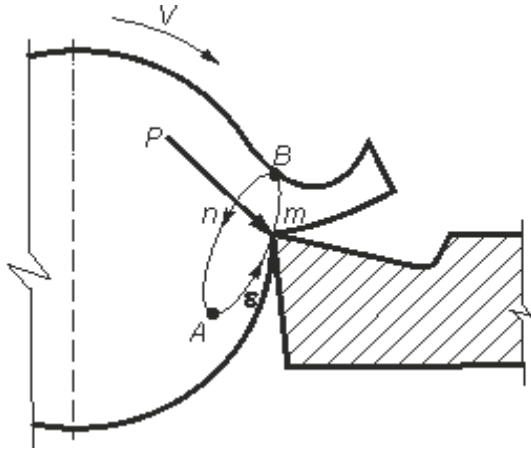


Рис. 3 – Еліпс взаємних переміщень різця і оброблювальної деталі

Щоб встановити критерій наявності автоколивань інструменту, треба знайти корені рівняння (21) і виконати умову від'ємного значення його дискримінанту. Як показали розрахунки, коливання виникають, коли між кутами α_0 і β має місце залежність $\alpha_0 = \frac{\beta}{2}$. В цьому випадку рівняння має вигляд:

$$r^2 \cdot \cos^2 \beta + 2 \cdot r \cdot (c_{x1} - c_{x2}) + (c_{x1} - c_{x2})^2 = 0. \quad (26)$$

Його корені дорівнюють:

$$r_1 = \frac{c_{x2} - c_{x1}}{\cos^2 \beta} \cdot (1 - \sin \beta), \quad r_2 = \frac{c_{x2} - c_{x1}}{\cos^2 \beta} \cdot (1 + \sin \beta).$$

Маємо висновок.

Автоколивання мають місце, якщо виконується нерівність

$$r_1 < K_r \cdot R < r_2, \quad (27)$$

де K_r – коефіцієнт питомого опору різанню;

R – радіус закруглення кромки різця;

$|r_1| < |r_2|$.

Треба змінювати вихідні дані для різця та режим різання.

Аналізуючи формулу (27), можна зробити висновок 2: оскільки корені рівняння (26) залежать від параметрів різця (E , B , H , L) і показників режиму різання (s , t , T), а коефіцієнт питомого опору K_r та кут β – від режиму різання, є можливість дослідити наявність, чи

відсутність автоколивань для конкретного різця, наприклад, змінюючи режим різання.

Пропонується блок-схема алгоритму розрахунку стійкого процесу різання при точінні (Рис. 4).

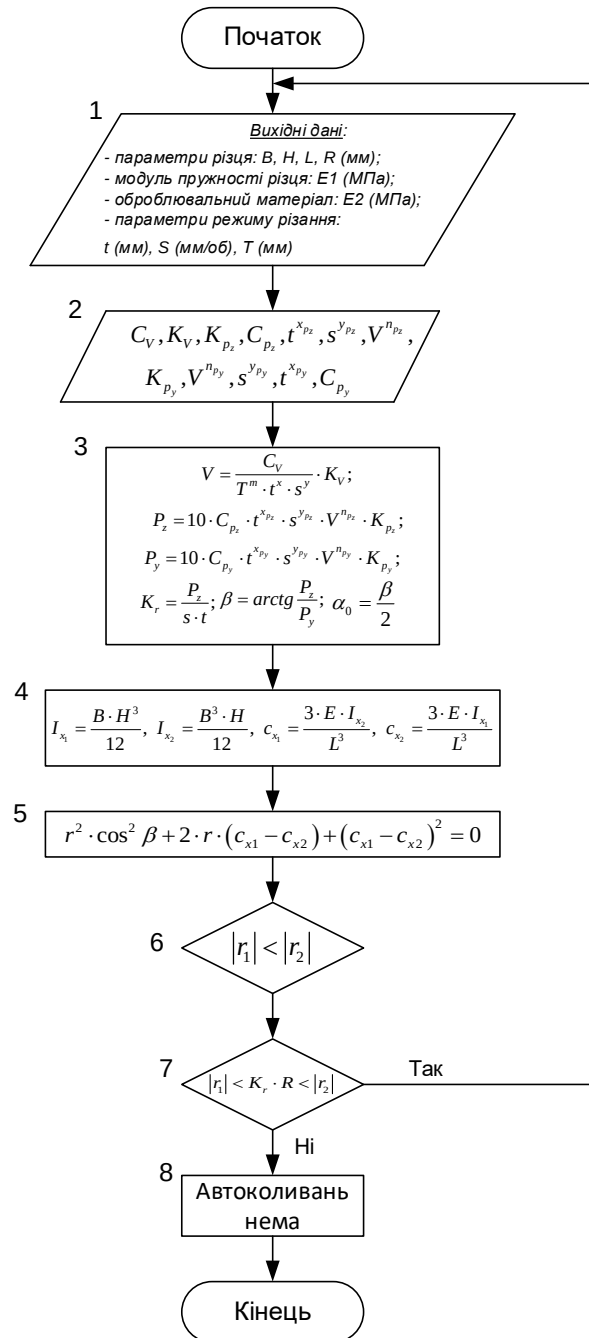


Рис. 4 – Блок-схема алгоритму розрахунку

Коментарі для користування блок-схемою

Блок 1. Вихідні дані: розміри різця B , H , L , R (мм); матеріал ріжучої частини, для якого знаходиться стійкість T , хв (час між двома заточками інструменту); параметри режиму різання (глибина t , подача S).

Блок 2. Інші дані, необхідні для розрахунку максимальної (з метою збільшення продуктивності обробки) швидкості різання V (м/хв) та складових сили різання P_z (Н) та P_y (Н) для заданого режиму різання t, S, V .

Блок 3. Розрахунок: V, P_z, P_y за емпіричними залежностями; K_r (Н/мм²) – питомий опір різанню, β – кут між силою різання та віссю Oy . Кут α_0 для головних осей жорсткості приймається таким, що дорівнює половині кута β .

Блок 4. Визначаються осьові моменти інерції перерізу різця I_{xy}, I_{xz} та коефіцієнти жорсткості вздовж головних осей c_{x1}, c_{x2} .

Блок 5. Розв'язання квадратного рівняння відносно коефіцієнту питомого опору різанню r .

Блоки 6 і 7. Перевірка попадання добутку $K_r \cdot R$, отриманого в блоці 3, в інтервал $(|r_1| \dots |r_2|)$, який знайдено з умови виникнення автоколивань. Якщо умови блоку 7 виконані, повертаються в блок 1, щоб змінити вихідні дані. Якщо умови блоку 7 не виконані, виводиться повідомлення блоку 8 «Коливань нема».

Режим різання: зовнішнє чорнове повздовжнє точіння прохідними різцями з пластинами з сплаву Т15К6. Оброблювальний матеріал: конструкційна сталь $\sigma_T = 750$ МПа, модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

За відомими з курсу «Теорія різання» емпіричними залежностями визначаються:

1. Швидкість різання дорівнює

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v,$$

де $K_v = 1$; $x = 0,15$; $m = 0,2$.

2. Складові сили різання дорівнюють:

$$P_z = 10 \cdot C_{p_z} \cdot t^{x_{p_z}} \cdot S^{y_{p_z}} \cdot V^{n_{p_z}} \cdot K_{p_z},$$

де $C_{p_z} = 300$; $x = 1,0$; $y = 0,75$; $n = -0,15$; $K_{p_z} = 0,957$.

$$P_y = 10 \cdot C_{p_y} \cdot t^{x_{p_y}} \cdot S^{y_{p_y}} \cdot V^{n_{p_y}} \cdot K_{p_y};$$

де $C_{p_y} = 243$; $x = 0,9$; $y = 0,6$; $n = -0,3$; $K_{p_y} = 0,924$.

Вибір довідкових даних здійснено по Довіднику технолога-машинобудівника. Розрахунки здійснені з використанням математичного редактора MathCad.

Отримані результати представлені в Таблиці 2.

Приклад

Таблиця 1

Вихідні дані								
Параметри різця, мм				Подача, мм/об	Глибина різання, мм	Стійкість, хв	Коеф.	Показник ступеню для V
R	B	H	L	S	t	T	C_v	y
1,5	12	16	170	0,08-0,1	1-3	40	420	0,2

Таблиця 2

Результати розрахунків і висновки												
R	B	H	L	s	t	T	C_v	y	r_1	$K_r \cdot R$	r_2	Наявність автоколивань
1,5	12	16	170	0,08	1	40	420	0,2	264,21	3388,59	1763,01	Нема
1,5	12	16	170	0,08	2	40	420	0,2	260,48	3441,85	1949,92	Нема
1,5	12	16	170	0,08	3	40	420	0,2	258,52	3473,39	2067,56	Нема
1,5	12	16	170	0,09	1	40	420	0,2	263,17	3301,91	1811,24	Нема
1,5	12	16	170	0,09	2	40	420	0,2	259,57	3353,81	2002,82	Нема
1,5	12	16	170	0,09	3	40	420	0,2	257,67	3384,54	2123,44	Нема

Висновки

1) Причиною виникнення автоколивань різця (тіла з двома ступенями вільності), якщо сила різання лінійно залежить від товщини стружки, що знімається, є зміна цієї товщини.

2) Автоколивання різця виникають тоді, коли добуток коефіцієнту питомого опору різанню на радіус закруглення різця знаходиться між коренями квадратного рівняння, яке відображає умову від'ємного значення дискримінанту характеристичного рівняння, що складається при знаходженні закону руху центру ваги різця.

3) Застосування запропонованого алгоритму дій для розрахунку стійкого процесу точіння дозволяє підібрати сукупність параметрів різця та режиму різання, при яких автоколивання різця будуть відсутні.

Перелік використаних джерел

- [1] Коливання неконсервативних механічних систем. Монографія / Бабенко О.Є., Боронко О.О., Лавренко Я.І., Трубочов С.І. Київ : Нац. техн. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. 153 с.
- [2] Bigoni D., Kirillov O. Dynamic stability and bifurcation in nonconservative mechanics. Springer Cham, 2019. 291 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93722-9>.
- [3] Bondarenko V.V., Markov Yu.G., Veretennikov V.G. Nonlinear dynamic analysis of mechanical systems with energy dissipation // *IUTAM/IFToMM Symposium on Synthesis of Nonlinear Dynamical Systems*, Riga, Latvia, 24-28 August 1998. Dordrecht: Springer, 2000. Pp. 115-122. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-4229-8_10.
- [4] Лимарь А.А., Каиров А.С. Свободные колебания токарных резцов со сменными пластинами. *Проблеми обчислювальної техніки і міцності конструкцій*. 2015. Вип. 24. С. 145-151.
- [5] Modeling of a turning tool holder with finite elements and simulation of its free vibration frequencies / I.H. Jaafar et al. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 576. Pp. 659-664. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.576.659>.
- [6] Siddhpura M., Paurobally R. Chatter stability and tool wear predictions in the presence of chatter vibrations for orthogonal turning process. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 11, no. 2. Pp. 67-82. DOI: <https://doi.org/10.7158/M12-019.2013.11.2>.
- [7] Хорошайло В.В., Гузенко В.С., Миранцев С.Л. Підвищення вібростійкості різців при обробці отворів великого діаметру на токарно-гвинторізних верстатах. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2014. Вип. 35. С. 131-135.
- [8] Хорошайло В.В. Повышение виброустойчивости растачивания на токарно-винторезных станках. *Technology Audit and Production Reserves*. 2016. Vol. 1, no. 1(27). Pp. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.60271>.
- [9] Gokulu T., Defant F., Albertelli P. Stability analysis of multi-insert rotating boring bar with stiffness variation. *Journal of Sound and Vibration*. 2024. Volume 586. Article 118497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118497>.
- [10] Способ и устройство для исследования регенеративных автоколебаний при точении / Ю.М. Внуков та ін. *Різання і інструмент в технологічних системах*. 2013. Вип. 83. С. 42-54.
- [11] Chen C.-K., Tsao Y.-M. A stability analysis of regenerative chatter in turning process without using tailstock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 29. Pp. 648-654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2573-5>.
- [12] Prediction methods and experimental techniques for chatter avoidance in turning systems: a review / G. Urbikain et al. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 21, Article 4718. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9214718>.
- [13] Кучугуров М.В. Влияние износа режущего инструмента на особенности динамики процесса резания при токарной обработке. *Різання і інструмент в технологічних системах*. 2015. Вип. 85. С. 163-170.
- [14] Influence of tool wear and workpiece diameter on surface quality and prediction of surface roughness in turning / C. Li et al. *Metals*. 2024. Vol. 14, No. 11, Article 1205. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14111205>.
- [15] An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning / Pham M.D., Le H.G., Mai D.D., Do T.S. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2020. Vol. 12(9). Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814020959885>.
- [16] Dimla E. Correlation of cutting force features with tool wear in a metal turning operation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2001. Vol. 215, no. 3. Pp. 435-440. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954405011515370>.

ON THE ISSUE OF THE OCCURRENCE OF SELF-OSCILLATIONS
OF A METAL-CUTTING MACHINE TOOL CUTTER

- Karpenko T.M.** PhD (Physics and Mathematical Sciences), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4042-0301>, e-mail: karpenko_t_n@pstu.edu;
- Shishkin V.V.** PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-2180>, e-mail: shishkin_v_v@pstu.edu

For modern mechanical engineering, the issue of strength and vibration resistance of various parts of the system is important: machine tool, device, tool, workpiece. In particular, taking into account the variety of tools used in turning, it is important to coordinate the parameters of the cutter and the cutting mode, which will ensure the absence of self-oscillations. As long as the movement of the cutter of the lathe was considered as the movement of a body with one degree of freedom, there were no explanations for the self-oscillation of this cutter. In this work, the occurrence of these fluctuations is explained by the theory of Tlustoy – Kudynov. The cutter is replaced by a dynamic model with two degrees of freedom, the elastic properties of which are equivalent to the properties of two mutually perpendicular springs located along the main stiffness axes. The cutting force is considered to be linearly dependent on the thickness of the chip being removed, the proportionality factor is the coefficient of specific resistance to cutting. Using Lagrange equations of the second kind, the differential equations of the movement of the incisor were compiled, and the coordinates of the center of gravity of the incisor along the main axes of rigidity were chosen as generalized coordinates. When finding the solution of the differential equations of motion, the characteristic quadratic equation is obtained. According to the sign of the discriminant of this equation, the possibility of self-oscillations of the cutter is revealed. A block diagram of the calculation algorithm for determining a stable cutting process during turning is given. An example of rough longitudinal turning of a workpiece with pass-through boring cutters with plates is considered. Processing material is structural steel. Feed and depth of cut were changed. The method of selecting a set of parameters of the technological process, in which there are no self-oscillations of the tool, described in the work, can be useful for students, graduate students and engineers engaged in the design and operation of lathes.

Keywords: vibration resistance of the cutter, main axes of rigidity, theory of coordinate links, algorithm.

References

- [1] O.Ie. Babenko, O.O. Boronko, Ya.I. Lavrenko, and S.I. Trubachov, *Kolyvannia nekonservatyvnykh mekhanichnykh system. Monohrafiia* [Oscillations of non-conservative mechanical systems. Monograph]. Kyiv, Ukraine: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Publ., 2020. (Ukr.)
- [2] D. Bigoni, and O. Kirillov, *Dynamic stability and bifurcation in nonconservative mechanics*. Springer Cham Publ., 2019. doi: 10.1007/978-3-319-93722-9.
- [3] V.V. Bondarenko, Yu.G. Markov, and V.G. Veretenikov, «Nonlinear dynamic analysis of mechanical systems with energy dissipation», in Proceedings of the IUTAM/IFTOMM Symposium on Synthesis of Nonlinear Dynamical Systems, Riga, Latvia, 1998, pp. 115-122. doi: 10.1007/978-94-011-4229-8_10.
- [4] A.A. Limar, and A.S. Kairov, «Svobodnye kolebaniya tokarnikh reztsov so smennimy plastynamy» [«The cutting tool with changeable plates free oscillation»], *Problemy obislyuval'noi mehaniky i mytsnosti konstruktivnykh sistem – Problems of computational mechanics and strength of structures*, vol. 24, pp. 145-151, 2015. (Rus.)
- [5] I.H. Jaafar, M.S.I. Dawood, I.A. Wazir, A.K.M.N. Amin, and Q.H. Shah, «Modeling of a turning tool holder with finite elements and simulation of its free vibration frequencies», *Advanced Materials Research*, vol. 576, pp. 659-664, 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.576.659.
- [6] M. Siddhpura, and R. Paurobally, «Chatter stability and tool wear predictions in the presence of chatter vibrations for orthogonal turning process», *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 67-82, 2013. doi: 10.7158/M12-019.2013.11.2.
- [7] V.V. Khoroshailo, V.S. Huzenko, and S.L. Myrantsev, «Pidvyshchennia vibrostiikosti riztsiv pry obrobtii otvoriv velykoho diamentru na tokarno-hvyntoriznykh verstatakh» [«Increasing the vibration resistance of cutters when machining large diameter holes on turning and threading machines»], *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system – Instrument reliability and optimization of technological systems*, vol. 35, pp.131-135, 2014. (Ukr.)
- [8] V.V. Khoroshailo, «Povishenye vybroustoichyvosty rastachyvanyia na tokarno-vyntoreznikh stankakh» [«Improving of vibration resistance by boring on turning lathes»], *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 1, no. 1(27), pp. 17-21, 2016. doi: 10.15587/2312-8372.2016.60271. (Rus.)
- [9] T. Gokulu, F. Defant, and P. Albertelli, «Stability analysis of multi-insert rotating boring bar with stiffness variation», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 586, article 118497, 2024. doi: 10.1016/j.jsv.2024.118497.

- [10] Yu.M. Vnukov, M.V. Kuchuhurov, S.I. Diadia, R.M. Zinchenko, and Ye.O. Honchar, «Sposob y ustroistvo dlia yssledovaniya reheneratyvnykh avtokolebaniy pry tocheniyu» [«Method and device for studying regenerative self-oscillations during turning»], *Rizannia i instrument v tekhnologichnykh systemakh – Cutting & Tools in Technological System*, vol. 83, pp. 42-54, 2013. (Rus.)
- [11] C.-K. Chen, and Y.-M. Tsao, «A stability analysis of regenerative chatter in turning process without using tailstock», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 29, pp. 648-654, 2006. doi: **10.1007/s00170-005-2573-5**.
- [12] G. Urbikain, D. Olvera, L. N. López de Lacalle, A. Beranoaguirre, and A. Elías Zuñiga, «Prediction methods and experimental techniques for chatter avoidance in turning systems: a review», *Applied Sciences*, vol. 9, no. 21, article 4718, 2019. doi: **10.3390/app9214718**.
- [13] M.V. Kuchuhurov, «Vliyaniye yznosa rezhushcheho ynstrumenta na osobennosty dynamyky protsessa rezaniya pry tokarnoi obrabotke» [«The influence of cutting tool wear on the dynamics of the cutting process during turning»], *Rizannia i instrument v tekhnologichnykh systemakh – Cutting & Tools in Technological System*, vol. 85, pp. 163-170, 2015. (Rus.)
- [14] C. Li et al., «Influence of tool wear and workpiece diameter on surface quality and prediction of surface roughness in turning», *Metals*, vol. 14, no. 11, article 1205, 2024. doi: **10.3390/met14111205**.
- [15] M.D. Pham, H.G. Le, D.D. Mai, and T.S. Do, «An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 12(9), pp. 1-11, 2020. doi: **10.1177/1687814020959885**.
- [16] E. Dimla, «Correlation of cutting force features with tool wear in a metal turning operation», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 215, no. 3, pp. 435-440, 2001. doi: **10.1243/0954405011515370**.
- Стаття надійшла 18.01.2025
Стаття прийнята 02.03.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Карпенко Т.М., Шишкін В.В. До питання щодо виникнення автоколивань різця металорізального верстату. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 76-83. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336270>.

ВИБІР ПРИВОДУ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВУ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Рой С.В.	директор, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв; аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0610-308X , e-mail: rsyntz@gmail.com ;
Яготін В.О.	головний інженер, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв; аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6691-8166 , e-mail: ntrz.gm@gmail.com ;
Прокопов А.Є.	головний механік, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв; аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9567-0033 , e-mail: prokopovglmtrz@gmail.com ;
Рябов Є.С.	канд. техн. наук, ст. науковий співробітник, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0753-514X , e-mail: riabov.ievgen@gmail.com

Розглянуто тяговий рухомий склад, який використовується у промисловому залізничному транспорті, обґрунтовано необхідність та напрямки його оновлення. Показано, що тягові властивості локомотиву залежать від типу приводу колісних пар. Розглянуто конструкції приводів колісних пар локомотивів з індивідуальними та груповим приводом. Запропоновано та виконано аналіз різних типів приводів колісних пар за критеріями, які визначають їх властивості та характеристики. Визначено наступні критерії: масо-габаритні, тягові та гальмівні властивості, енергоефективність, вплив на колію, складність конструкції приводу та технологічні вимоги до виготовлення, технічне обслуговування та ремонтпридатність, надійність, економічні показники. Для кожного з критеріїв запропоновано додаткові показники, з урахуванням яких проведений аналіз різних видів групового і індивідуального приводу. За результатами аналізу встановлено, індивідуальний привод має децю кращу енергоефективність, однак потребує більшої кількості обладнання. Це підвищує як капітальні витрати, так і витрати при експлуатації цього типу приводу. Груповий привод забезпечує високі тягові властивості в умовах нестабільного зчеплення колеса з рейкою, а динамічний вплив на колію є нижчим. Меньша кількість вузлів у груповому приводі сприяє зниженню його вартості та витрат на технічне обслуговування та ремонт. Запропоновано спосіб для кількісної оцінки, на основі якого побудовано пелюсткову діаграму для наочного порівняння типів приводів колісних пар. З урахуванням отриманих у статті результатів вбачається доцільним використання групового приводу колісних пар для локомотивів промислового залізничного транспорту. Доцільним є використання мономоторних візків, використання яких покращує розміщення обладнання та дозволяє використовувати енергозбереження засобами тягового електроприводу.

Ключові слова: локомотив, привід колісної пари, візок, зчеплення, редуктор, електродвигун, тягова система.

Постановка проблеми

Великі вітчизняні гірничо-збагачувальні комбінати та підприємства по видобутку корисних копалин відкритим способом для транспортування сировини та продуктів її переробки зазвичай використовують залізничний транспорт. Для водіння поїздів використовується спеціалізований рухомий склад – тягові агрегати змінного струму ОПЕ1А, ОПЕ1АМ, постійного струму ПЕ2М, ПЕ2У, промислові електровози постійного струму серії EL21, магістральні тепловози серій 2ТЕ10М, 2ТЕ10У, 2ТЕ116, М62 влі та маневрово-вिवізні локомотиви ТЕМ7. У маневровій роботі використовуються тепловози ТЕМ2, ЧМЕЗ, ТГМ4, ТГМ6.

Аналіз експлуатаційних даних виявив, що рухомий склад на цих підприємствах експлуатується у режимах, що суттєво відрізняються від проектних. Це відбувається як у наслідок невідповідності умов експлуатації показникам тягового рухомого складу, так і

невідповідності характеристик рухомого складу тій поїзній роботі, яку він виконує.

На сьогоднішній день зношеність локомотивного парку досягла критичного рівня. Близько 90% локомотивів, що працюють в промисловості, відпрацювали свій нормативний строк служби. Тому питання оновлення рухомого складу промислових залізниць є актуальним. Частково це здійснюється шляхом модернізації. Наприклад, ТОВ «МТРЗ» виконав модернізації тепловозів 2ТЕ10, ТЕМ7, тягового агрегату ОПЕ1АМ, що підвищило їх тягово-енергетичні властивості, зменшило споживання паливно-енергетичних ресурсів, підвищило надійність [1]. Однак при модернізації використовується серійний рухомий склад, що унеможливило адаптацію його певних властивостей і характеристик до умов експлуатації. Тому завдання створення нового тягового рухомого складу для промислових залізниць є актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з найважливіших елементів рухомого складу, від якого залежать тягові властивості, є привод колісних пар [2].

Традиційним для тягового рухомого складу є індивідуальний привід колісних пар, при якому кожна колісна пара приводить у рух окремим електродвигуном. Він може бути побудований з редуктором (це найбільш поширений варіант) та безредукторним.

На тяговому рухомому складі кар'єрних залізниць використовуються «запозичені» з магістральних ліній тепловози, для яких характерне опорно-осьове підвішування тягового електродвигуна з жорстким одностороннім приводом (рис. 1а). Для тягових агрегатів та промислових електровозів (як і для магістральних електровозів) характерне опорно-осьове підвішування тягового двигуна з жорстким двостороннім приводом

(рис. 1б). В обох випадках використовуються підшипники ковзання. Такі рішення поєднують високу надійність, простоту обслуговування та ефективність передачі тягового зусилля [3]. На сучасному тяговому рухомому складі використовують колісно-моторні блоки з підшипниками кочення та одностороннім приводом (рис. 1в). У конструкціях вітчизняних колісно-моторних блоків використовуються одноступінчасті редуктори.

Іншим варіантом індивідуального тягового приводу є безредукторний, при якому ротор електродвигуна безпосередньо з'єднаний з колісною парою. На сьогоднішній день такий тип приводу достатньо поширений на моторвагонному рухомому складі та міському електротранспорті. Компанія CRRC створила магістральний електровоз з безредукторним приводом колісних пар [4].

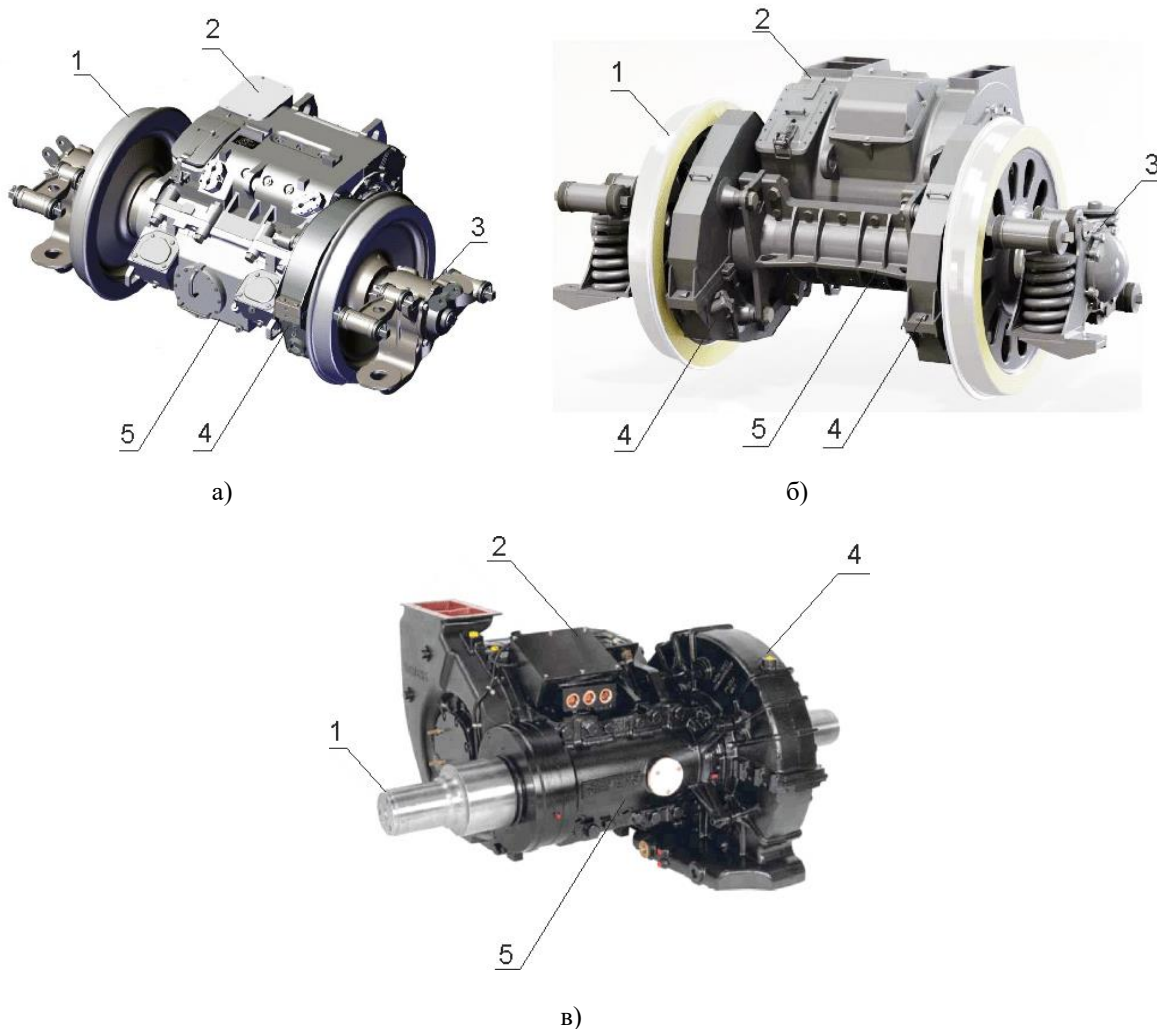


Рис. 1 – Опорно-осьове підвішування тягового двигуна (рисунок з мережі Internet): а) з одностороннім приводом та підшипниками ковзання, б) з двостороннім приводом, в) з одностороннім приводом та підшипниками кочення. 1 – колісна пара або вісь колісної пари; 2 – тяговий двигун; 3 – буксовий вузол; 4 – тяговий редуктор; 5 – кришки моторно осьових підшипників

Альтернативою індивідуальному приводу є груповий привод колісних пар. Аналіз конструкцій виявив, що його можна розділити на привод з центральним мотор-редуктором та на привод із застосуванням моноmotorних візків.

У приводі з центральним мотор-редуктором використовується мотор-редукторний блок, який за допомогою карданних валів з'єднується з осьовими редукторами візків (рис. 2). Особливістю є постійне механічне з'єднання усіх колісних пар локомотива.

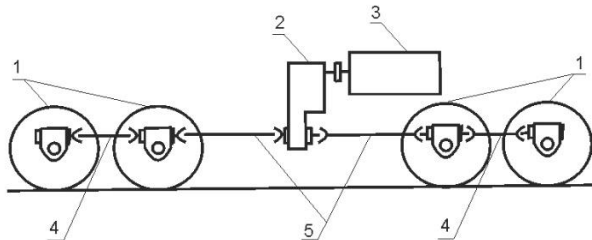


Рис. 2 – Схема приводу з центральним мотор-редуктором та карданним приводом осьових редукторів: 1 – колісні пари з осьовими редукторами; 2 – гідропередача; 3 – дизельний двигун; 4 – карданні вали візків; 5 – карданні вали роздаткові

На залізницях світу експлуатувались та експлуатується низка локомотивів з груповим приводом [3, 5]. В останній час в різних країнах є спроби побудови як нових, так і модернізації старих локомотивів з груповим приводом. Тепловоз BR203H – це модернізація

тепловозу V100 з гідравлічною передачею потужності, яка була виконана компанією Alstom [6]. Від старого тепловозу використана екіпажна частина, до якої був зроблений тяговий електропривод змінного струму. Чеська компанія Kolejové pohonu використовує старі тепловози для створення акумуляторних локомотивів [7]. Гібридний локомотив LHy-M є прототипом локомотиву, на якому тестуються енергозберігаючі технології [8]. Відомим є проєкт HELMS компанії Toshiba з переобладнання застарілого тепловозу з гідравлічною передачею [9]. Як і в попередніх випадках, від старого тепловозу використовується екіпажна частина.

Французька компанія CFD пропонує нові локомотиви з груповим приводом колісних пар [10]. Також застосування групового приводу колісних пар можна знайти і на швидкісних локомотивах.

На вітчизняному рухомому складі груповий привод з центральним мотор-редуктором застосовується на тягових енергетичних модулях, які використовуються у колійному господарстві. Відомий тепловоз ТЕМ12, на якому застосовано груповий привод від тягових електродвигунів, які розміщені під головною рамою [5].

Також ТОВ «МТРЗ» модернізував тепловози ТГМ6 із застосуванням тягового асинхронного електроприводу при збереженні групового приводу колісних пар (рис. 3) [11].

Як бачимо, груповий привод з центральним мотор-редуктором здебільшого застосовується при модернізації застарілих тепловозів, від яких «успадковується» екіпажна частина.

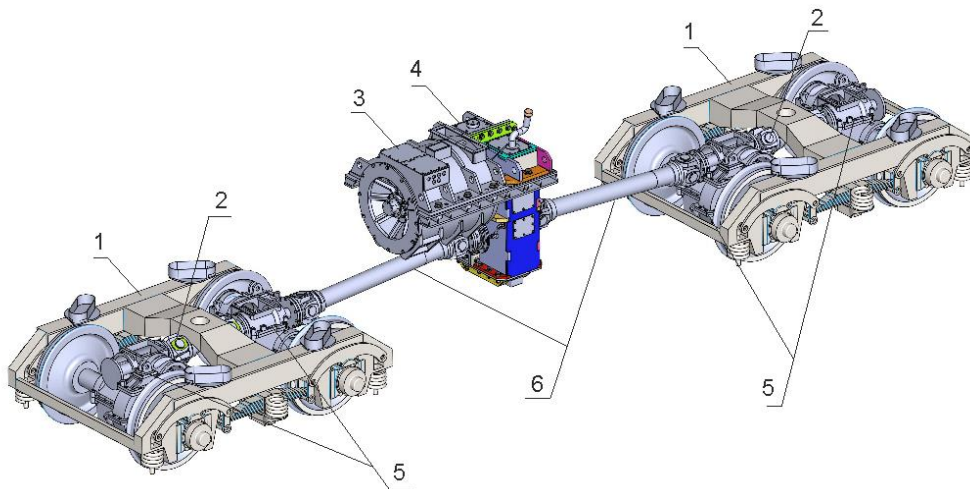


Рис. 3 – Схема приводу з центральним електричним мотор-редуктором та карданним приводом осьових редукторів тепловозу ТГМ6Д-МЕ: 1 – двовісний візок; 2 – вали карданні візкові; 3 – тяговий електричний двигун; 4 – тяговий редуктор; 5 – колісні пари з осьовими редукторами; 6 – карданні вали роздаткові

При використанні моноmotorних візків механічне з'єднання колісних пар здійснюється у межах одного візка [5]. У цьому випадку один електродвигун приводить у рух декілька механічно зв'язаних колісних пар. З'єднання колісних пар у візку відбувається за

допомогою роздаткових редукторів, або комбінацією роздаткового редуктора та осьових редукторів. Найрозповсюдженішими є двовісні моноmotorні візки (рис. 4а, 4в), але існують і конструкції тривісних моноmotorних візків (рис. 5, рис. 6).

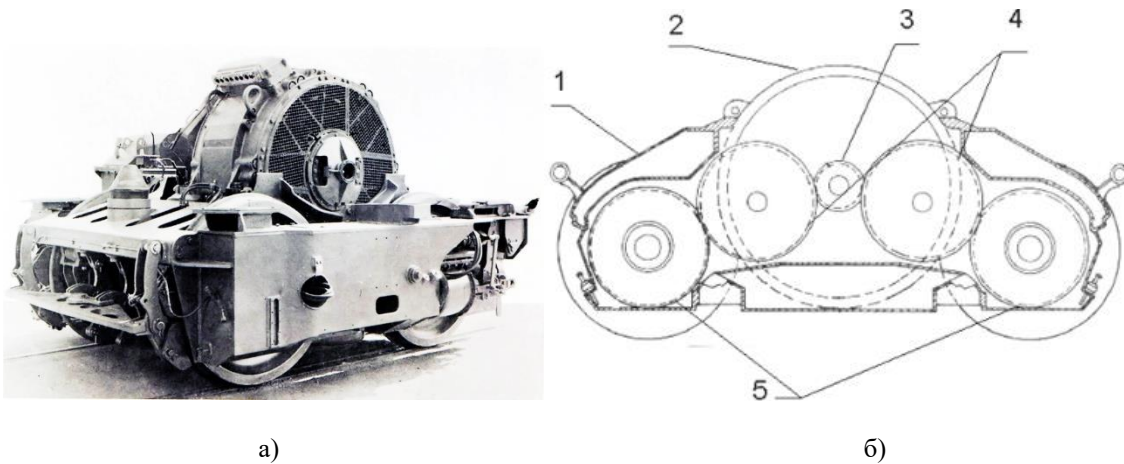


Рис. 4 – Двовісний номоторний візок електровозу BB16500, а) – загальний вигляд візка б) – схема приводу колісних пар візка: 1 – корпус редуктора, 2 – тяговий електродвигун, 3 – привідна шестерня, 4 – проміжні («паразитні») зубчасті колеса, 5 – зубчасті колеса колісних пар

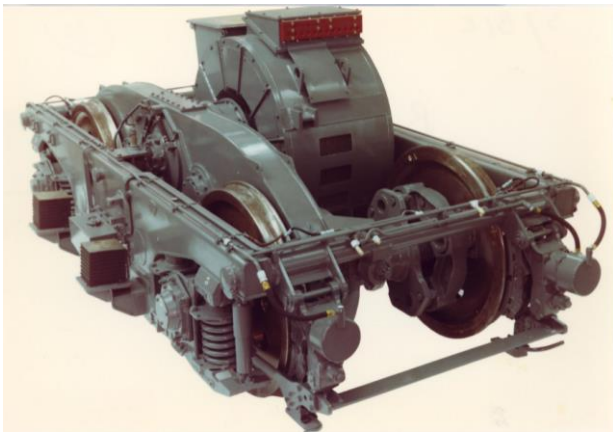


Рис. 5 – Загальний вигляд двовісного номоторного візка електровозу ВЛ83

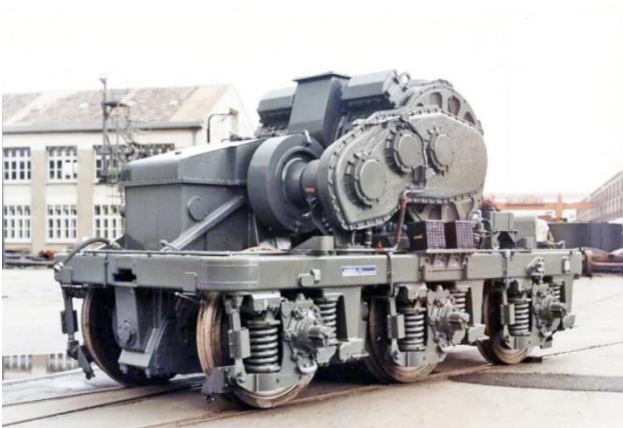


Рис. 6 – Загальний вигляд тривісного номоторного візка локомотивів СС6500, СС72000

Великий досвід у проектуванні, побудові та експлуатації локомотивів з номоторними візками мають французькі національні залізниці [12]. З 1960-х до 1990-х французьким концерном Alstom були спроектовані і побудовані низка локомотивів, які мали груповий привід візків [13]. Конструкція візків та приводу колісних пар на цих серіях схожа і відмінності полягають тільки у передаточному числі та конструкції двигунів, які в них застосовуються. Номоторні візки застосовуються як на електровозах, так і на тепловозах. Також є локомотиви, побудовані для французьких залізниць з тривісними номоторними візками [14]. Локомотиви з номоторними візками продовжують експлуатуватися в Іспанії [15], Угорщині [16] та інших європейських країнах.

Локомотиви з номоторними візками розроблялися і вітчизняними локомотивобудівними заводами. Відомі дослідні електровози ВЛ83 та ВЛ40, на яких тестувалися двовісні номоторні візки [5, 17].

Локомотиви з номоторними візками достатньо поширені, і свого часу були основою локомотивного парку багатьох залізничних операторів.

Таким чином, на сьогодні на локомотивах можливе застосування тягового приводу різних конструкцій. Аналіз їх властивостей є значущим етапом при виборі типу приводу колісних пар [18-20].

Мета статті

Метою статті є аналіз та порівняння різних типів приводу колісних пар для локомотивів промислового транспорту.

Виклад основного матеріалу

Аналіз та порівняння різних типів приводів колісних пар проведено з використанням критеріїв, які дозволяють оцінити технічні властивості та економічні

показники як безпосередньо типу приводу, так і оцінити його вплив на властивості локомотиву в цілому.

Прийняті наступні критерії, які відображають різні властивості та характеристики типу приводу колісних пар:

- масо-габаритні;
- тягові та гальмівні властивості;
- енергоефективність;
- вплив на колію;
- складність конструкції приводу та технологічні вимоги до виготовлення;

– технічне обслуговування та ремонтпридатність;

- надійність;
- економічні показники.

Кожен критерій є комплексним та включає декілька показників. Нижче наведено результати аналізу доступних джерел інформації, присвячених тяговим приводам колісних пар та їх впливу на властивості локомотиву.

Масо-габаритний критерій враховує:

- загальну кількість обладнання;
- масу та розміри обладнання;
- розміри та масу візків;
- раціональне розміщення на локомотиві.

Груповий привід відрізняється від індивідуального меншою загальною кількістю обладнання. В першу чергу, це стосується тягових електродвигунів. Використання меншої кількості тягових електродвигунів тягне за собою зменшення кількості супутнього тягового електрообладнання, мотор-вентиляторів охолодження і т.д. Конструкції редукторного і безредукторного приводів залежать від типу рухомого складу, однак кількість різнотипного обладнання в них більша.

При груповому приводі зменшення маси та розмірів обладнання, в першу чергу – електричного, пов'язане з підвищенням питомих масо-габаритних показників при зростанні потужності обладнання. Наприклад, на основі досвіду французьких локомотивобудівників маємо такі данні. У чотиривісних електровозів, що мають тривалу потужність 2135 кВт та 2580 кВт, використання двох тягових електродвигунів замість чотирьох призвело до зниження загальної маси електродвигунів майже на 25% при збереженні загальної потужності. Також при використанні групового приводу зменшується використання кабельної продукції. Водночас при індивідуальному приводі є більші можливості для оптимізації обладнання за масо-габаритними показниками.

При груповому приводі зменшуються розміри і маса візків. Зменшення маси тягових електродвигунів та можливість використання тягових редукторів у якості несучої конструкції візка також сприяють зменшенню маси рами візка. Також у локомотивів з груповим приводом, на відміну від індивідуального, конструктивно візки мають менші розміри, що пояснюється особливостями конструкції та принципами передачі тягового зусилля. Отже, компактність візків із

груповим приводом досягається завдяки спрощенню конструкції приводу та перенесенню частини обладнання з візків на основну раму локомотива. Це дає переваги у вазі, розмірах і вартості, але може мати обмеження у точності розподілу тягового зусилля між осями. Завдяки компактнішій конструкції візки з груповим приводом мають більшу жорсткість і стійкість до деформацій під час експлуатації.

Безредукторний привід колісних пар також дозволяє зменшити габаритні розміри візків.

Раціональне розміщення обладнання на локомотиві є важливим для забезпечення його ефективної роботи, зручного обслуговування, безпеки експлуатації та економічної доцільності. Використання меншої кількості обладнання при груповому приводі полегшує його розташування у кузові локомотива та у візках. Механічні елементи групового приводу зазвичай компактніші порівняно з індивідуальними приводами. Дас можливість розмістити обладнання, так щоб були враховані усі вимоги до ергономічності, безпеки, легкості та зручності обслуговування, електричної сумісності, вібро- та шумоізоляції, теплові і аеродинамічні аспекти.

Тягові та гальмівні властивості локомотива можуть бути оцінені наступними показниками:

- використання зчіпної маси;
- реалізація граничних зусиль;
- передача сил тяги та гальмування з візка на кузов.

При груповому приводі використання зчіпної маси та величина коефіцієнта зчеплення на 6%...35% вище, ніж локомотивів з індивідуальним приводом колісних пар. Це пов'язане із замкнутістю ланцюга передачі зусиль у груповому приводі, що викликає перерозподіл тягово-гальмівних зусиль по колісним парам у разі зміни значень зовнішніх факторів (навантаження на вісь, коефіцієнта зчеплення та ін.). Тобто при груповому приводі спостерігається підвищення стабільності зчеплення колеса з рейкою, чого не має при індивідуальному приводі колісних пар.

Реалізація граничних зусиль залежить від коефіцієнта зчеплення. Як було зазначено вище, замкнутість ланцюга передачі зусиль у груповому приводі викликає перерозподіл тягово-гальмівних зусиль. Цим пояснюється і менша ймовірність боксування та юза локомотивів із груповим приводом.

Досвід французьких локомотивобудівельників говорить про наступне. Коефіцієнт зчеплення локомотивів, маючих механічний зв'язок між колісними парами, у інтервалі швидкостей 10 км/год...30 км/год вищий на 15%, ніж у локомотивів з індивідуальним приводом. При русанні також відзначається вищий на 7% коефіцієнт зчеплення. У діапазоні швидкості від 0 км/год до 10 км/год на годину коефіцієнт зчеплення інтенсивно зменшується, а у діапазоні швидкостей до 50-60 км на годин змінюється дуже мало. З цього виходить, що у локомотивів з груповим приводом завдяки вищому коефіцієнту зчеплення на низьких і середніх швидкостях

ефективніше реалізує тягове зусилля, особливо при русанні з місця та на складних ділянках колії.

Реалізація граничних тягових зусиль при індивідуальному приводі колісних пар потребує індивідуального живлення і керування тяговими електродвигунами. Також підвищенню тягових властивостей приєє застосування пристроїв для довантаження візків.

Традиційно для *передачі сил тяги та гальмування* між візком і кузовом зусиль при індивідуальному приводі використовується центральний шкворень, який з'єднує візок із кузовом локомотива. Така система характерна майже для усього вітчизняного тягового рухомого склад з індивідуальним приводом. Однак у локомотивах з груповим приводом використання шкворня неможливе. Це зумовлено розташуванням тягового двигуна на візку, і унеможливлене використання центрального шкворню та опорно-повертаючих пристроїв. Такі локомотиви використовують різні види люлькового підвішування та багатовузлові похилі зв'язки з кузовом локомотива, через які передаються тягові зусилля. Система складніша, але забезпечує більшу гнучкість у передачі зусиль, підвищує плавності ходу локомотива, а також забезпечує високу надійність і міцність конструкції, рівномірність розподілу зусиль на весь кузов, що позитивно впливає на використання зчіпної маси. Застосування таких зв'язків візка і кузова доцільно і на локомотивах з індивідуальним приводом колісних пар.

За критерієм *енергоефективності* розглянуто наступні показники:

- коефіцієнт корисної дії приводу;
- опір рухові;
- енергозбереження засобами тягового електроприводу.

Коефіцієнт корисної дії приводу та опір рухові тісно пов'язані між собою. При груповому приводі причини зменшення коефіцієнту корисної дії (ККД) та збільшення опору руху локомотивів викликані одними й тими ж факторами. Додаткові статичні та динамічні навантаження, які виникають внаслідок замкнутості ланцюга передачі тягового зусилля, призводять до: зниження надійності елементів групового тягового приводу порівняно з індивідуальним; зменшення коефіцієнта корисної дії приводу на 2-6 %, що пов'язано не тільки зі втратами енергії внаслідок надлишкових зв'язків, а і зі збільшенням числа зубчастих коліс та підшипників в осьових редукторах. Водночас зростання потужності тягових електродвигунів призводить до підвищення їх коефіцієнту корисної дії приводу.

У безредукторному приводі досягається найвищий ККД, оскільки привод не містить редукторів. Однак це вимагає суттєвого збільшення обертаючого моменту електродвигуна, який безпосередньо з'єднується з колісною парою.

Енергозбереження засобами тягового електроприводу локомотива базується на впровадженні сучасних технологій керування, підвищенні ефективності перетворення та використання електричної енергії.

Основні напрямки включають застосування тягових електродвигунів змінного струму, які мають вищий ККД в широкому діапазоні навантаження, забезпечують більш точний контроль швидкості та зусилля, мінімізуючи втрати енергії.

Локомотиви з індивідуальним приводом, де кожна колісна пара має окремий електродвигун, забезпечують точніше керування тягою та електродинамічним гальмуванням, що дає змогу зменшити споживання енергії у русі. Проте в таких локомотивах складніші системи керування і є необхідним застосування вартісних напівпровідникових перетворювачів. Загалом, вибір оптимальної системи залежить від умов експлуатації.

Вплив на колію оцінено за такими показниками:

- динамічний вплив на колію;
- вписування локомотива у криві ділянки шляху.

Зменшенню *динамічного впливу на колію* сприяє зниження так званої «наведеної маси», яка залежить від радіуса, на якому розташовані центри мас тягових двигунів відносно центру ваги візка. Тому очевидно, що візки з одним тяговим двигуном, який розміщений у центрі візка, мають найменшу «наведену масу» і, як показують експериментальні дослідження, зумовлюють незначний вплив на шлях. Практично єдиними засобом зменшення «наведеної маси» є зменшення цього радіуса шляхом розміщення тягових двигунів якомога ближче до центральної частини візка або ж використання одного двигуна замість двох або трьох.

При безредукторному приводі можливе створення візків з меншою базою, що дещо знижує «наведену масу».

Вписування локомотива в криві ділянки шляху є однією з критичних характеристик локомотиву. При використанні одного двигуна на візок з'являється можливість зменшити діаметр колісних пар локомотива та понизити центр ваги локомотива. У свою чергу пониження центру ваги дозволяє локомотивам краще проходити криві, особливо з підвищенням зовнішньої рейки. Також при пониженому центрі ваги у локомотива збільшується опір перекидання на кривих ділянках шляху. Зменшення бази візка полегшує проходження кривих ділянок.

Порівняльний аналіз *складності конструкції приводу та технологічних вимог до його виготовлення* показує наступне.

Локомотиви з груповим приводом мають вищу механічну *складність конструкції* через необхідність використання спільного приводу для кількох колісних пар, що потребує високої технологічної точності виготовлення механічних компонентів. В таких локомотивах система передачі тяги між кількома колісними парами потребує додаткових механічних елементів, таких як редуктори, карданні вали, шестерні тощо. Водночас удосконалення індивідуального приводу також відбувається шляхом створення інтегрованих колісних моторних блоків з вузлами, які потребують підвищеної точності виготовлення та специфічних матеріалів.

Вимоги до технологічної точності елементів групового приводу (редукторів, карданних валів, зубчатих коліс) має критичне значення для збереження рівномірного розподілу тяги та мінімізації втрат енергії. Технологічна точність виготовлення таких компонентів має бути високою, щоб забезпечити безперебійну роботу. Це підвищує складність конструкції при використанні групового приводу, оскільки потрібно забезпечити точну взаємодію цих компонентів для ефективної передачі тягових зусиль. Але для обох видів характерним є те, що механічні елементи мають витримувати значні динамічні навантаження, що також потребує особливої уваги до технологічної точності у виготовленні для збереження надійності обох типів приводу.

В сучасних умовах та реаліях експлуатації тягового рухомого складу технічне обслуговування та ремонтпридатність займають одне з найважливіших місць при оцінці ефективності того чи іншого виду локомотивів та його складових. Тож згідно цих критеріїв можна оцінити приводи по наступним показникам:

- трудомісткість технічного обслуговування і ремонту;
- чутливість до зміни розмірів.

Зменшення *трудомісткості технічного обслуговування і ремонту* локомотивів з груповим приводом оцінюється на 40-50% меншою у порівнянні з індивідуальним приводом. Це пов'язано з меншою кількістю обладнання. Зокрема, відсутність необхідності в обслуговуванні окремих електродвигунів для кожної колісної пари та зменшення кількості електронних компонентів призводить до скорочення часу, необхідного для діагностики, проведення перевірок, ремонтів та налагодження систем приводу. Вбачається, що для групового приводу можлива спрощена система обслуговування, що дозволяє швидше виконувати перевірки, заміни деталей та інші операції, що, в свою чергу, знижує загальний час простою локомотива і підвищує ефективність його експлуатації.

Таким чином, локомотиви з груповим приводом є більш економічними в плані трудомісткості обслуговування та ремонту, що особливо важливо для операторів, які мають великий парк рухомого складу і повинні знижувати витрати на технічне обслуговування без шкоди для надійності та ефективності роботи.

Варто відзначити, що для безредукторного приводу та сучасних конструкцій редукторних приводів їх ремонт потребує розформування і повторного формування колісних пар, що значно підвищує витрати на проведення таких робіт.

Чутливість до зміни розмірів визначає працездатність приводу при зміні розмірів його елементів, що є неминучим при експлуатації. Особливо варто відзначити підвищені вимоги до різниці діаметрів по колу катання колісних пар локомотивів з груповим приводом. У таких локомотивів ця різниця має більший вплив та значною мірою визначає перерозподіл тягово-гальмівних зусиль по осях у русі, ніж у локомотивів з

індивідуальним приводом колісних пар. Вона в середньому встановлюється для локомотивів з груповим приводом 1 мм [5]. Це означає більш прискіпливий контроль за станом колісних пар та збільшення технічних обслуговувань, пов'язаних з їх обточуванням у процесі експлуатації.

Надійність оцінено за такими показниками:

- надійність елементів тягового приводу;
- надійність локомотиву в цілому;
- живучість.

Надійність елементів тягового приводу та надійність локомотиву пов'язані і аналіз показує наступне. У локомотивів з груповим приводом, завдяки використанню меншого числа обладнання, простішим електричним схемам та компонентам регулювання передачі, спостерігається підвищення коефіцієнта надійності. Також зазвичай механічні компоненти локомотивів з груповим приводом мають більший запас міцності. Це пов'язано з тим, що елементи такого приводу сприймають дещо більші навантаження.

Локомотиви з індивідуальним приводом навпаки мають простішу будову механічних систем, але за рахунок більшої кількості електронних компонентів, вищу ймовірність їх поломок. Тому обидві системи можна оцінити приблизно однаково по цим критеріям.

Живучість локомотивів з груповим приводом дещо нижча, оскільки відмова одного тягового агрегату може повністю зупинити локомотив. Вихід з ладу одного тягового двигуна чи елементів візка суттєво впливає на експлуатаційну готовність локомотива. У той час, як відмова одного елемента у тяговій одиниці з індивідуальним приводом не завжди призводить до зупинки всього локомотива, оскільки інші двигуни можуть продовжувати працювати, хоча і з деяким зниженням тягово-гальмівних зусиль та ефективності.

Економічний критерій оцінено за такими показниками:

- вартість обладнання;
- вартість технічного обслуговування і ремонту.

Окрім очевидної меншої *вартості обладнання* через меншу його кількість при побудові локомотивів з груповим приводом також спостерігається зменшення використання кабельної продукції, що теж впливає на вартість локомотива в цілому. Вбачається, що локомотиви з груповим приводом дешевші, ніж локомотиви з індивідуальним, внаслідок того, що в них використовується менша кількість кольорових металів.

Початкова вартість локомотивів з індивідуальним приводом вища через більшу кількість електронних компонентів, таких як інвертори, контролери швидкості та електродвигуни для кожної осі. Вартість електричних систем та їх компонентів у локомотивів з індивідуальним приводом вище ще і за рахунок необхідності забезпечення високої надійності електронних систем та їх складного налаштування для взаємодії між собою.

Вартість технічного обслуговування і ремонту суттєво залежить від типу приводу. Як зауважено вище, для тягового рухомого складу з груповим приводом характерна менша кількість обладнання, простіша конструкція елементів приводу, трудомісткість планових видів ремонту нижча на 40-50%. Оскільки конструкція базується на механічних компонентах, їх обслуговування здебільшого обмежується перевіркою та заміною зношених деталей, таких як редуктори, шестерні та підшипники. Такі роботи не потребують складного діагностичного обладнання або спеціалізованих інструментів, тому витрати на обслуговування будуть відносно нижчими у порівнянні з індивідуальним.

Локомотиви з груповим приводом мають нижчу початкову вартість і менші витрати на технічне

обслуговування та ремонт. Це зумовлено меншою кількістю електронних компонентів і меншою складністю конструкції. Локомотиви з індивідуальним приводом мають вищу початкову вартість через складніші електронні системи, а також більші витрати на технічне обслуговування та ремонт через високу вартість електронних компонентів і необхідність спеціалізованого обслуговування.

Таким чином, у кожного типу приводу є переваги і недоліки. У табл. 1 наведено узагальнені кількісні оцінки по кожному критерію з урахуванням показників, опис яких наведено вище. Кожен з критеріїв оцінюється за п'ятибальною шкалою. Вищий бал ставиться у випадку, коли за цим показником характеризується як «найкращий».

Таблиця 1

Узагальнені оцінки типів приводів колісних пар

Критерій	Індивідуальний привод		Груповий привод	
	з редуктором	безредукторний	з центральним мотор-редуктором	з моноmotorними візками
Масо-габаритні показники	3	3	5	4
Тягові та гальмівні властивості	4	4	5	5
Енергоефективність	5	5	4	4
Вплив на колію	4	4	5	4
Складність конструкції приводу та технологічні вимоги до виготовлення	4	4	4	4
Технічне обслуговування та ремонтпридатність	4	4	4	4
Надійність	4	4	4	4
Економічні показники	3	4	5	5

На основі табл. 1 побудовано порівняльну діаграму (рис. 7), у якій кожний критерій оцінювання має свою вісь.

Головною перевагою індивідуального приводу є можливість окремого керування процесами електродвигунів кожної колісної пари. Це дозволяє врахувати розкид параметрів електродвигуна, діаметр колісної пари, фактичне навантаження колісної пари і стан зчеплення колеса з рейкою, здійснювати енергозберігаюче керування тощо. Однак для реалізації цих переваг необхідно забезпечити індивідуальне живлення і керування електродвигунів, що тягне за собою підвищення вартості тягового електроприводу. А це вже є недоліком. При груповому приводі колісних пар кількість

обладнання зменшується, а постійний механічний зв'язок окремих колісних пар забезпечує стабільність зчеплення та зростання тягових властивостей. Однак при груповому приводі колісних пар допускаються суттєво менші відхилення параметрів від нормативних значень.

Аналіз експлуатаційних режимів роботи тягового рухомого складу на промислових залізницях свідчить, що значну частину часу рухомий склад працює в умовах, які суттєво відрізняються від проектних. Унаслідок цього обладнання використовується неефективно та має обмежений термін служби. В таких умовах доцільно застосовувати технічні рішення з невисокою вартістю.



Рис. 7 – Порівняльна діаграма різних типів приводу колісних пар локомотивів

Одним із перспективних варіантів є використання групового приводу колісних пар, що може забезпечити:

- покращення тягових характеристик завдяки підвищенню коефіцієнта зчеплення і стабільності його значень;
- зменшення динамічного впливу на колію, що сприятиме її збереженню та зменшенню витрат на утримання інфраструктури.;
- зменшення вартості на технічне обслуговування та ремонт;
- підвищення ефективності використання рухомого складу та зменшення експлуатаційних витрат.

Особливий акцент на застосуванні групового приводу пов'язаний із незадовільним станом колій промислових підприємств: саме незадовільний стан колії викликає сумніви щодо можливості реалізації високих тягових зусиль при індивідуальному приводі. Натомість експлуатація тепловозів з гідравлічною передачею потужності, які мають груповий привод колісних пар, підтверджує високі тягові властивості локомотивів з груповим приводом колісних пар. Очікується, що впровадження такого рішення дозволить знизити витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання, а також зменшити вартість як нових, так і модернізованих локомотивів. Запровадження такого рішення відповідає сучасним вимогам до економічності, надійності та збереження інфраструктури. Воно має значний потенціал для оптимізації роботи промислових залізниць і зменшення витрат як для операторів, так і для підприємств

Висновки

Оновлення тягового рухомого складу промислового залізничного транспорту є важливим для

забезпечення стабільної роботи підприємств. Для забезпечення ефективного використання локомотивів їх властивості і характеристик мають бути адаптовані до умов роботи на підприємствах.

За результатами проведеного в дослідженні аналізу типу приводів колісних пар перспективним для застосування на промислових локомотивах є груповий привод колісних пар, зокрема з використанням моноmotorних візків. У цьому випадку забезпечуються високі тягові властивості, прийнятний вплив на колію та хороші можливості для розміщення обладнання. Використання енергозберігаючих технологій у тяговій системі дозволить підвищити енергоефективність локомотиву з моноmotorними візками.

Перелік використаних джерел

- [1] Проєкти модернізації. URL: <https://ntrz.com.ua/realizovannye-proekty-modernizatsii/> (дата звернення: 01.03.2025).
- [2] Гетьман Г.К., Голік С.М. Тягові передачі електродвигуна: Навчальний посібник. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
- [3] Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник : у 2 ч. / Панченко С.В., Бабаєв М.М., Блиндюк В.С., Нерубацький В.П. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
- [4] CRRC introduces 10.4 MW freight electric locomotive to domestic service in China. URL: <https://en.railmarket.com/news/rolling-stock/19350-crrc-introduces-10-4-mw-freight-electric-locomotive-to-domestic-service-in-china> (дата звернення: 01.03.2025).
- [5] Маневровий локомотив з електричною передачею потужності та груповим приводом колісних пар / Рябов Є.С., Єріцянін Б.Х., Якунін Д.І., Демидов О.В.

- Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022, м. Харків, 19-21 жовтня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 179.*
- [6] Hybrid locomotives overview of construction solutions / Konarzewski M., Niezgoda T., Stankiewicz M., Szurgott P. *Journal of KONES*. 2013. № 20. Pp. 127-134. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1135325>.
- [7] Kolejové pohony a.s. URL: <https://www.kolejovepohony.cz/en/> (дата звернення: 01.03.2025).
- [8] Locomotiva hibrid de manevră – premieră mondială. Transformarea locomotivei diesel hidraulică LDH 1250 CP în Locomotiva hibrid LHy-M. URL: <http://www.locomotivahibrid.ro/wp-content/uploads/2017/10/LHy-M- Studiu-de-solutii-Etapa-1-1.pdf> (дата звернення: 01.03.2025).
- [9] HELMS. Hybrid Electro-Mechanical Shunter. URL: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrastructure/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/TOSHIBA_HELMS_Poster.pdf (дата звернення: 01.03.2025).
- [10] Compagnie de Chemins de Fer Départementaux. URL: <https://www.cfd.group/> (дата звернення: 01.03.2025).
- [11] Застосування тягового електроприводу при модернізації тепловозу ТГМ6 / С. Рой та ін. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. 2023. Вип. 46. С. 93-102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177>.
- [12] Transmission de l'effort de traction du moteur à l'essieu. URL: <https://actgv.fr/wp-content/uploads/2014/06/train-dengrenage-organes-m%C3%A9canique.pdf> (дата звернення: 01.03.2025).
- [13] Locomotives with Mono Motor Bogies. URL: <https://www.loco-info.com/view.aspx?id=-594&type=Type&cookies=accept> (дата звернення: 01.03.2025).
- [14] CC6500 locomotive. URL: <https://docrail.fr/les-cc-6501-a-6574-les-plus-belles-de-toutes> (дата звернення: 01.03.2025).
- [15] Locomotoras eléctricas 250 y 251. URL: http://users.fini.net/~bersano/espanol-spanish/Fichas_material_motor_Renfe.pdf (дата звернення: 01.03.2025).
- [16] SÜVEGES LÁSZLÓ A MÁV «igáslova», a V43 sorozatú villamosmozdony 60 éves. URL: https://vasutgepeszet.hu/wp-content/uploads/vasutgepeszet_2023_2_belivek-web-14-suveges-B.pdf (дата звернення: 01.03.2025).
- [17] Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник : у 2 ч. / Панченко С.В., Бабаєв М.М., Блиндюк В.С., Нерубацький В.П. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Ч. 2. 204 с.
- [18] Мороз В.І., Громов В.І., Логвіненко О.А. Збільшення технічного ресурсу тягових зубчатих передач рухомого складу залізниць. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, м. Харків, 17-20 травня 2023 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 242.*
- [19] Басов Г.Г., Яцько С.І. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу: навч. посібник. Харків: Апекс+, 2005. 248 с.
- [20] Чигирик Н.Д., Найдьон Є.О., Сумцов А.Л. Аналіз схемних рішень та вибір тягового привода швидкісного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. № 103. С. 103-111. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92524>.

CHOICE OF LOCOMOTIVE WHEEL PAIR DRIVE FOR INDUSTRIAL RAIL TRANSPORT

Roi S.V.	director, Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC, Mykolaiv; postgraduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0610-308X , e-mail: rsvntrz@gmail.com ;
Yagotin V.O.	chief engineer, Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC, Mykolaiv; postgraduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6691-8166 , e-mail: ntrz.gm@gmail.com ;
Prokopov A.E.	chief mechanic, Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC, Mykolaiv; postgraduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9567-0033 , e-mail: prokopovglmntrz@gmail.com ;
Riabov Ie.S.	PhD (Engineering), senior research fellow, associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0753-514X , e-mail: riabov.ievgen@gmail.com

The traction rolling stock used in industrial railway transport is considered, the necessity and directions of its renewal are substantiated. It is shown that the traction properties of a locomotive depend on the type of wheelset drive. The designs of locomotive wheelset drives with individual and group drives are considered. An analysis of different types of wheelset drives is proposed and performed according to the criteria that determine their properties and characteristics. The following criteria have been identified: weight and dimensions, traction and braking properties, energy efficiency, impact on the track, complexity of the drive design and technological requirements for manufacturing, maintenance and maintainability, reliability, and economic indicators. For each of the criteria, additional indicators are proposed, taking into account which the analysis of different types of group and individual drives was carried out. The analysis shows that an individual drive has slightly better energy efficiency, but requires more equipment. This increases both capital and operating costs of this type of drive. The group drive ensures high traction properties in conditions of unstable wheel-rail adhesion, and the dynamic impact on the track is lower. A smaller number of units in the group drive helps to reduce its cost and maintenance and repair costs. A method for quantitative assessment is proposed, on the basis of which a petal diagram is constructed for a visual comparison of the types of wheelset drives. Taking into account the results obtained in the article, it seems expedient to use a group drive of wheelsets for locomotives of industrial railway transport. It is advisable to use mono-engine bogies, the use of which improves the placement of equipment and allows the use of energy saving by means of a traction electric drive.

Keywords: locomotive, wheelset drive, bogie, adhesion, gearbox, electric motor, traction system.

References

- [1] Modernization proposals. [Online]. Available at: <https://ntr.z.com.ua/realizovannie-proekti-modernizatsii/>. Accessed on: March 01, 2025.
- [2] H.K. Hetman, and S.M. Holik, *Tiahovi peredachi elektrorukhomoho skladu: Navchalnyi posibnyk* [Traction drives of electric rolling stock: Training manual]. Dnipro, Ukraine: PF «Standart-Servis» Publ., 2020. (Ukr.)
- [3] S.V. Panchenko, M.M. Babaiev, V.S. Blyndiuk, and V.P. Nerubatskyi, *Konstruksii ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu* [Design and Dynamics of Electric Rolling Stock: Textbook], vol. 1. Kharkiv, Ukraine: UkrDUZT Publ., 2018. (Ukr.)
- [4] CRRC launches a freight electric locomotive with a capacity of 10.4 MW for domestic traffic in China. [Online]. Available at: <https://en.railmarket.com/news/rolling-stock/19350-crrc-introduces-10-4-mw-freight-electric-locomotive-to-domestic-service-in-china>. Accessed on: March 01, 2025.
- [5] E.S. Ryabov, B.H. Yeritsyan, D.I. Yakunin, and O.V. Demidov, «Manevrovyy lokomotyv z elektrychnoiu peredacheiu potuzhnosti ta hrupovym pryvodom kolisnykh par» [«Shunting locomotive with electric power transmission and group drive of wheel pairs»], in Abstracts of the 30th International scientific and practical conference MicroCAD-2022 «Information technologies: science, engineering, technology, education, health», Kharkiv, Ukraine, 2022, p. 179. (Ukr.)
- [6] M. Konarzewski, T. Niezgoda, M. Stankiewicz, and P. Szurgott, «Hybrid locomotives overview of construction solutions», *Journal of KONES*, № 20, pp. 127-134, 2013. doi: 10.5604/12314005.1135325.
- [7] 7 Kolejové pohony a.s. [Online]. Available at: <https://www.kolejovepohony.cz/en/>. Accessed on: March 01, 2025.
- [8] Locomotiva hibrid de manevră – premieră mondială. Transformarea locomotivei diesel hidraulică LDH 1250 CP în Locomotiva hibrid LHy-M. [Online]. Available at: <http://www.locomotivahibrid.ro/wp-content/uploads/2017/10/LHy-M-Studiu-de-solutii-Etapa-1-1.pdf>. Accessed on: March 01, 2025.
- [9] HELMS. Hybrid Electro-Mechanical Shunter. [Online]. Available at: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/TOSHIBA_HELMS_Poster.pdf. Accessed on: March 01, 2025.
- [10] Compagnie de Chemins de Fer Départementaux. [Online]. Available at: <https://www.cfd.group/>. Accessed on: March 01, 2025.
- [11] A. Kachan, A. Tikhonov, D. Yakunin, and E. Ryabov, «Zastosuvannia tiahovoho elektropryvodu pry modernizatsii teplovozu THM6» [«Application of the traction electric drive in the modernization of the TGM6 diesel locomotive»], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 46, pp. 93-102, 2023. doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288177.
- [12] Transmission de l'effort de traction du moteur à l'essieu. [Online]. Available at: <https://actgv.fr/wp-content/uploads/2014/06/train-dengrenage-organes-m%C3%A9canique.pdf>. Accessed on: March 01, 2025.
- [13] Locomotives with Mono Motor Bogies. [Online]. Available at: <https://www.loco-info.com/view.aspx?id=-594&type=Type&cookies=accept>. Accessed on: March 01, 2025.
- [14] CC6500 locomotive. [Online]. Available at: <https://docrail.fr/les-cc-6501-a-6574-les-plus-belles-de-toutes>. Accessed on: March 01, 2025.
- [15] Locomotoras eléctricas 250 y 251. [Online]. Available at: <https://www.loco-info.com/view.aspx?id=-594&type=Type&cookies=accept>. Accessed on: March 01, 2025.

- [16] SÜVEGES LÁSZLÓ A MÁV «igáslova», a V43 sorozatú villamosmozdony 60 éves. [Online]. Accessed on: https://vasutgepeszet.hu/wp-content/uploads/vasutgepeszet_2023_2_belivek-web-14-suveges-B.pdf. Accessed on: March 01, 2025.
- [17] S.V. Panchenko, M.M. Babaiev, V.S. Blyndiuk, and V.P. Nerubatskyi, *Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu* [Design and Dynamics of Electric Rolling Stock: Textbook], vol. 1. Kharkiv, Ukraine: UkrDUZT Publ., 2018. (Ukr.)
- [18] V.I. Moroz, V.I. Gromov, and O.A. Logvinenko, «Zbilshennia tekhnichnoho resursu tiahovykh zubchatykh peredach rukhomoho skladu zaliznyts» [«Increasing the technical resource of traction gear transmissions of railway rolling stock»], in abstracts of the XXXI Int. scientific and practical conference MicroCAD-2023 «Information technologies: science, engineering, technology, education, health», Kharkiv, Ukraine, 2023, p. 242. (Ukr.)
- [19] G.G. Basov, and S.I. Yatsko, *Rozvytok elektrychnoho motorvahonnoho rukhomoho skladu: navch. posibnyk* [Development of electric motor-car rolling stock : textbook]. Kharkiv, Ukraine: Apeks+ Publ., 2005. (Ukr.)
- [20] N.D. Chygyryk, E.O. Naidyon, and A.L. Sumtsov, «Analiz skhemnykh rishen ta vybir tiahovoho pryvoda shvydkisnoho rukhomoho skladu» [«Analysis of circuit solutions and choice of traction drive of high-speed rolling stock»], *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, no. 103, pp. 103-111, 2016. doi: 10.18664/1994-7852.164.2016.92524. (Ukr.)
- Стаття надійшла 04.03.2025
Стаття прийнята 23.03.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Вибір приводу колісних пар локомотиву для промислового залізничного транспорту / Рой С.В., Яготін В.О., Прокопов А.Є., Рябов Є.С. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 50. С. 84-95. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336271>.

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 620

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336272

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ВІТЧИЗНЯНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОЛІУРЕТАНОВІЙ ОСНОВІ

Іщенко А.О.	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6189-7830 , e-mail: ischenko50@ukr.net ;
Девін Л.М.	д-р техн. наук, професор, директор навчального центру НТУУ «КПІ» – ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, зав. лабораторією надійності інструментів з надтвердих матеріалів, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1452-9904 , e-mail: ldevin350@gmail.com ;
Рассохін Д.О.	канд. техн. наук, доцент, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3479-9485 , e-mail: Dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de ;
Носовська О.В.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1313-4767 , e-mail: nosovska_o_v@pstu.edu ;
Капустін С.В.	аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4204-8449 , e-mail: stanislav.kapustin.engineer@gmail.com ;
Бем Р.	д-р техн. наук, професор, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7768-4592 , e-mail: robert.boehm.1@htwk-leipzig.de

У статті представлено результати порівняльного аналізу фізико-механічних властивостей двох вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі – ДК2 (розробка Приазовського державного технічного університету) та АК.УР-03 (виробництво компанії «Капітел», м. Дніпро). Дослідження спрямоване на визначення граничної міцності матеріалів при стисканні та оцінку їхньої деформованості, що є критично важливим фактором при виборі матеріалів для захисту обладнання, яке працює в умовах високих навантажень. Особливу увагу приділено також аналізу пористості матеріалів як одного з ключових параметрів, що впливає на їх довговічність та експлуатаційні характеристики. Експериментальні випробування проводилися на гідропресі потужністю 10 тонн із поетапним збільшенням навантаження. Було виміряно зміну товщини зразків на кожному етапі для обчислення ступеня деформації та напружень. Результати показали, що матеріал ДК2 демонструє вищу міцність (209 МПа проти 170 МПа для АК.УР-03) та значно меншу відносну деформацію (12,5% проти 43% відповідно). Це вказує на доцільність його використання в конструкціях, де критично важливими є міцність і стабільність розмірів під навантаженням. Крім механічного аналізу, у роботі було проведено дослідження пористості матеріалів за допомогою 3D-макроскопу після їх руйнування в охолодженому стані. Для матеріалу ДК2 виявлено 977 пор, які займали близько 9,79% площі дослідженої поверхні. Причиною пороутворення визначено хімічну реакцію між ізоціанатами та вологістю, внаслідок чого виділяється вуглекислий газ, що створює мікропухирці в структурі полімеру. Запропоновано методи зменшення пористості, зокрема введення дисперсних наповнювачів (графіт, оксид міді), які можуть зв'язувати CO₂, покращуючи однорідність структури та міцність композиту. Практичне значення результатів полягає в можливості ефективного застосування матеріалу ДК2 у гірничо-металургійній, машинобудівній та енергетичній галузях для відновлення та захисту обладнання, що експлуатується в умовах значних навантажень і агресивних середовищ. Робота також відкриває перспективи для подальших досліджень щодо підвищення експлуатаційних характеристик полімерних композитів шляхом модифікації їх структури та складу.

Ключові слова: поліуретанові композити, міцність на стиск, пористість, деформація, дисперсні наповнювачі, матеріалознавство, полімерна матриця.

Постановка проблеми

Однією з важливих задач сучасного машинобудування є пошук, розробка та впровадження нових матеріалів, які здатні забезпечити надійну експлуатацію

обладнання в умовах інтенсивних механічних, термічних та корозійних навантажень. Особливо актуальним це завдання є для таких галузей промисловості, як металургія, енергетика та транспорт, де обладнання

зазнає постійних та значних навантажень, що призводить до його передчасного зносу та руйнування.

Серед перспективних рішень цієї проблеми виділяється використання композитних матеріалів на поліуретановій основі, які поєднують високу міцність із достатньою гнучкістю та стійкістю до агресивних факторів експлуатації. Однак поширеним недоліком таких матеріалів є утворення пористості у процесі їх виготовлення, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики, знижуючи міцність та довговічність виробів.

З огляду на це, існує важлива науково-технічна проблема вибору оптимальних композиційних матеріалів із мінімальною пористістю та максимальними механічними характеристиками для відновлення та захисту технологічного обладнання, яке експлуатується в екстремальних умовах.

У зв'язку з цим у даній роботі проведено порівняльний аналіз двох вітчизняних поліуретанових композитів (ДК2 та АК.UR-03), що широко використовуються для ремонту і зміцнення деталей промислового обладнання. Вибір цих матеріалів зумовлено їх високим потенціалом для практичного застосування у таких конструкціях, як деталі прокатного обладнання, гірничо-металургійні вузли, насоси та засувки, де особливо важлива стабільність механічних властивостей та стійкість до деформації.

Результати цього дослідження дозволять вирішити важливе практичне завдання – забезпечити вибір найкращого матеріалу для конкретних інженерних застосувань, підвищити ефективність відновлення та захисту технологічних конструкцій і обладнання, а також зменшити витрати підприємств на ремонт та обслуговування. Крім того, результати дослідження дозволяють поглибити розуміння механізмів утворення пористості та запропонувати методи її ефективного усунення, що є актуальним науковим завданням сучасного матеріалознавства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній науці та промисловості поліуретанові композити займають важливе місце, завдяки поєднанню легкості, високої міцності та стійкості до динамічних навантажень. Останні дослідження та розробки в цій галузі спрямовані на покращення механічних властивостей, довговічності та функціональності цих матеріалів [1, 2]. Одним із перспективних напрямків є створення нанокомпозитів на основі поліуретану [3, 4]. Зокрема, дослідження показали, що додавання вуглецевих нанотрубок і графенових нанопластинок до поліуретанової матриці сприяє значному підвищенню міцності та жорсткості матеріалу. Використання графену з розміром пластинок близько 1,5 мкм та високою питомою площею поверхні (750 м²/г) у поєднанні з вуглецевими нанотрубками забезпечує синергетичний ефект, покращуючи механічні характеристики композиту на 43% порівняно з чистим поліуретаном [5].

Іншим важливим напрямком є інтеграція матеріалів з фазовим переходом (PCM) у поліуретанові піни для підвищення теплоізоляційних властивостей. Використання багатомасштабного моделювання з використанням фізично-інформованих нейронних мереж дозволяє точно прогнозувати теплопровідність таких композитів, що сприяє оптимізації їх дизайну та застосуванню в енергоефективних будівлях [6]. Практичне застосування поліуретанових композитів охоплює різні галузі промисловості. Зокрема, поліуретанові гарячі клеї широко використовуються в одноразовому виробництві, взуттєвій, автомобільній та пакувальній промисловості, забезпечуючи високу продуктивність та екологічну безпеку. Крім того, поліуретанові матеріали знаходять застосування в приладобудуванні, електроніці, архітектурі, будівництві, меблевій промисловості, рекламі та сільському господарстві, що підкреслює їх універсальність та ефективність [7, 8].

В Україні також активно ведуться дослідження в галузі полімерних композиційних матеріалів. Зокрема, розробка та вивчення полімерних композитів з антибактеріальними властивостями на основі поліуретану є актуальним напрямком, що має значний потенціал для застосування в медицині та фармацевтиці [9, 10]. Сучасна інженерія висуває високі вимоги до матеріалів, що використовуються в конструкціях, які забезпечують захист обладнання від різних видів механічних впливів. Композитні матеріали на поліуретановій основі займають важливе місце завдяки своїм унікальним властивостям: поєднанню легкості, високої міцності та стійкості до динамічних навантажень. Однак під час вибору матеріалу для конкретних інженерних завдань критично важливо враховувати не тільки механічну міцність, а й здатність матеріалу до деформації (зім'яття), що безпосередньо впливає на його експлуатаційні характеристики за екстремальних умов [11, 12]. У даному дослідженні обрано для порівняння два вітчизняні композитні матеріали – ДК2, розроблений у ДВНЗ «ПДТУ», та АК.UR-03, вироблений фірмою «Капітел» (м. Дніпро). Вибір цих матеріалів зумовлений їх активним застосуванням у промисловості для відновлення та захисту металевих поверхонь. Зокрема, вони використовуються для ремонту та захисту насосів, засувок та інших металоконструкцій, що піддаються корозійному та ерозійному зносу. Важливим є те, що ці матеріали можуть ефективно захищати обладнання навіть в агресивних середовищах, подовжуючи термін його експлуатації та знижуючи витрати на ремонт та обслуговування.

Мета статті

Мета дослідження полягає у визначенні характеристик міцності матеріалів під час стискання, а саме у вимірюванні граничної міцності та ступеня зминання зразків, що дасть змогу зробити обґрунтований вибір матеріалу для використання в захисних конструкціях. Наукова новизна даної роботи полягає у проведенні

порівняльного аналізу міцнісних характеристик зазначених композитів при стисканні, що дозволяє оцінити їхню ефективність у реальних умовах експлуатації. Практична значущість дослідження полягає у наданні рекомендацій щодо вибору оптимального матеріалу для конкретних інженерних задач, що сприятиме підвищенню надійності та довговічності захисних покриттів у різних галузях промисловості.

Обладнання та методика випробувань

Навантаження виконували через кожні 0,5 тонни з виміром після кожного навантаження товщини зразка. Температура приміщення: $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Для проведення випробувань було підготовлено зразки у вигляді шайб із заданими геометричними параметрами: діаметр: 12 мм, товщина: 2,1 та 1,61 мм. Різниця у розмірах пов'язана з усадкою матеріалу під час затвердження.

Випробовувані матеріали:

- ДК2: вітчизняний композитний матеріал, розроблений у ДВНЗ «ПДТУ»;
- АК.UR-03: композитний матеріал на поліуретановій основі, вироблений фірмою «Капітел» (м. Дніпро).

Випробування проводилися на експериментальній установці Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля. Основне обладнання включало гідропрес потужністю 10 тонн – для створення необхідного стискаючого навантаження та еталонного силоміра ДС 5 – для точного вимірювання прикладеної сили.

Навантаження на зразки збільшували покроково згідно з таким набором значень сили (F, кН): 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 кН. При кожному прирості навантаження проводилося вимірювання поточної товщини зразка, що давало змогу визначити ступінь зминання (відносна деформація) матеріалу. Такий поетапний метод дозволив не тільки оцінити граничну міцність матеріалу, а й проаналізувати його деформованість під дією екстремальних навантажень.

Аналіз макроструктури і дослідження поверхні зламу проводили з використанням 3D-макроскопа Keyence, оснащеного вбудованою системою аналізу, що дає змогу точно вимірювати геометричні характеристики пор (HTWK Leipzig).

Виклад основного матеріалу

У ході експериментальних досліджень було проведено порівняльний аналіз двох композитних матеріалів на поліуретановій основі – ДК2 (розроблений у ДВНЗ «ПДТУ») та АК.UR-03 (виробництво компанії «Капітел», м. Дніпро). Результати досліджень подано у вигляді графічних залежностей та табличних даних (таблиця 1).

Аналіз отриманих результатів демонструє, що матеріал ДК2 проявляє суттєво вищу стійкість до стискаючих навантажень порівняно з матеріалом АК.UR-03. При максимальному навантаженні у 30 кН матеріал ДК2 досягає напруження 209,69 МПа з відносною деформацією близько 20,95%. Для порівняння, матеріал АК.UR-03 в аналогічних умовах демонструє меншу міцність – лише 169,85 МПа, а також значно більшу відносну деформацію, яка досягає 49,07%. Отримані результати підтверджують, що матеріал ДК2 має кращі механічні властивості, зокрема вищу міцність і нижчу деформативність, що робить його більш ефективним для використання у вузлах та елементах конструкцій, які працюють за умов високих навантажень і потребують стабільності форми та розмірів. Значні розбіжності в показниках міцності та деформації між двома композитами можна пояснити відмінностями у їх складі, технології виготовлення, а також різним ступенем пористості матеріалів.

На наведеному графіку (рис. 1) залежності напруження від відносної деформації чітко видно різницю у механічній поведінці досліджуваних матеріалів ДК2 та АК.UR-03 під навантаженням.

Крива для матеріалу ДК2 характеризується стрімкішим зростанням напруження із меншою деформацією. Це вказує на вищу жорсткість, міцність та стійкість до стискувальних навантажень порівняно з матеріалом АК.UR-03. ДК2 демонструє крихко-пружний характер поведінки, що підтверджується різким наростанням напруження при незначних деформаціях. Матеріал АК.UR-03 має більш пологі криву, що свідчить про виражену пластичну поведінку, тобто вищу здатність до деформування під навантаженням, але меншу міцність. Це свідчить про його підвищену пластичність і, як наслідок, меншу опірність високим механічним навантаженням порівняно з ДК2.

Таблиця 1

Результати навантаження композитних матеріалів

Навантаження, кН	ДК2					АК.UR-03				
	Товщина зразка, мм	Деформація, мм	Діаметр зразка, мм	Напруження ДК2	Відносна деформація ДК2	Товщина зразка, мм	Деформація, мм	Діаметр зразка, мм	Напруження АК.UR	Відносна деформація АК.UR
0	2,10	0,00	12,0	0,00	0,00	1,61	0,00	10,5	0,00	0,00
5	1,95	0,15	12,5	40,76	7,14	1,42	0,19	11,00	52,64	11,80
10	1,87	0,23	12,7	78,98	10,95	1,20	0,41	12,00	88,46	25,47
15	1,80	0,30	13,0	113,07	14,29	1,05	0,56	12,80	116,63	34,78
20	1,75	0,35	13,2	146,22	16,67	0,93	0,68	14,00	129,99	42,24
25	1,71	0,39	13,3	180,04	18,57	0,86	0,75	14,50	151,47	46,58
30	1,66	0,44	13,5	209,69	20,95	0,82	0,79	15,00	169,85	49,07

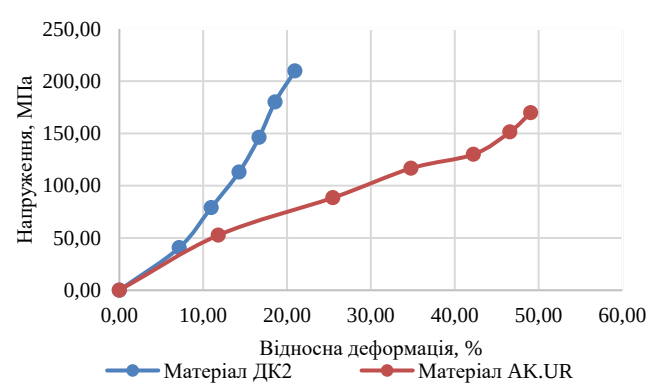


Рис. 1 – Графік залежності напруження-відносної деформації матеріалів ДК2 і АК.УР-03

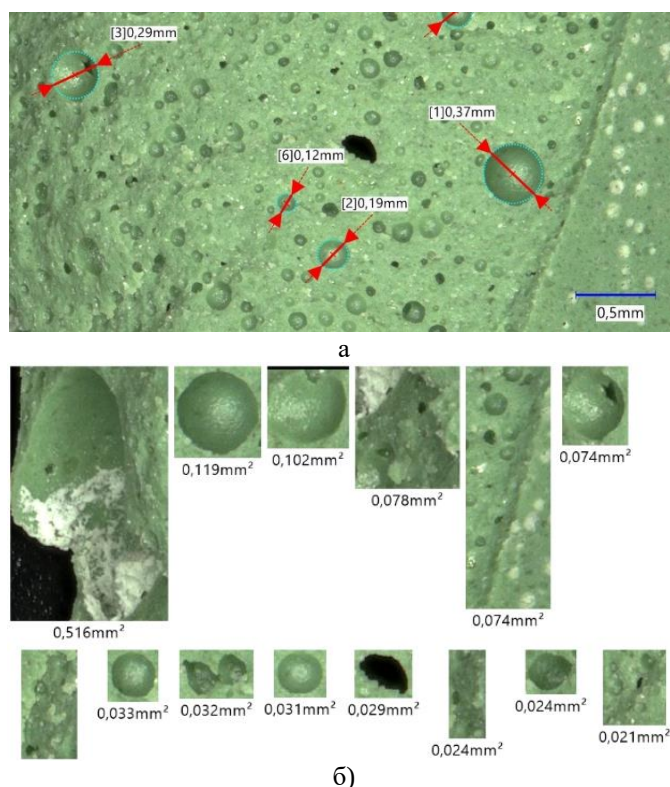


Рис. 2 – Розподіл пір на поверхні зламу зразка ДК2: а – поверхня зламу з діаметрами пір, б – основні типи пір, із зазначенням їхніх площ, виявлені в зразку ДК2

Утворення пористості, як правило, призводить до погіршення фізико-механічних властивостей матеріалів, таких як міцність, пружність і пластичність. Зменшення пористості дає змогу підвищити ці властивості. Пори можуть виникати внаслідок різних чинників, включно з усадкою матеріалу під час затвердіння, виділенням газів у процесі кристалізації та іншими технологічними особливостями. Слід зазначити, що зразки АК.УР-03 у процесі затвердіння мають усадку 12,5%, що відбилося на зміні початкового діаметра зразка (10,5 проти 12 мм для ДК2). Усадка об'єму створює внутрішні напруження і сприяє формуванню мікропор та тріщин. Це особливо характерно для матеріалів з високим ступенем зшивання полімерних ланцюгів.

Причиною утворення пор у нашому випадку є виділення вуглекислого газу (CO_2) у процесі реакції між ізоціанатом і поліолом [13]. Внаслідок цього процесу утворюються бульбашки в тілі затверділого полімеру. Ці бульбашки діють як концентратори напружень, підвищуючи ризик руйнування матеріалу. Авторами статті було проведено макроаналіз матеріалу ДК2 на наявність пір у тілі та їх відсотковий вміст (рисунок 2).

У цій роботі представлено аналіз пористості поверхні зразка ДК2, підданого попередньому охолодженню в рідкому азоті за температури -60°C протягом 5 хвилин, з подальшим механічним руйнуванням (таблиця 2).

Таблиця 2

Значення пористості поверхні зразка ДК2

Параметри	Площа, мм ²	Окружність, мм	Максимальний діаметр, мм	Мінімальний діаметр, мм
Середнє значення	0,003	0,168	0,056	0,033
Стандартне відхилення	0,018	0,272	0,082	0,043
Максимальне значення	0,516	4,284	1,262	0,637
Мінімальне значення	0	0	0	0
Загальна сума виміряних значень	3,01	163,953	55,086	32,537

У результаті проведеного дослідження було виявлено 977 пор, загальна площа яких склала 3,010 мм². Пори займають 9,79 % від загальної дослідженої площі поверхні зразка, що дорівнює 30,749 мм². Не дивлячись на значно вищі значення міцності полімерного матеріалу ДК2, порівняно з АК.UR-03, проте питання зниження пористості залишається відкритим. Одним з ефективних методів зниження пористості є введення дисперсних наповнювачів. Додавання порошкових дисперсних наповнювачів (наприклад, доломітового порошку) в кількості 0,001-5,0 % від маси суміші сприяє хімічному зв'язуванню вуглекислого газу, перетворюючи його на воду і мінеральні речовини. Це призводить до зменшення розмірів пор і зниження ризику руйнування матеріалу. Важливо визначити оптимальну кількість наповнювача, оскільки надмірне його введення може призвести до агломерації частинок та збільшення пористості. Забезпечення рівномірного розподілу наповнювача в полімерній матриці є ключовим для зниження пористості та покращення механічних властивостей композиту. Ще одним ефективним методом є функціоналізація поверхні наповнювачів. Це може покращити сумісність з полімерною матрицею та сприяти зменшенню пористості.

Необхідно провести подальші дослідження для глибшого розуміння механізмів утворення пір і розроблення ефективних методів їх запобігання.

Висновки

Проведене дослідження порівняльного аналізу міцнісних характеристик вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі продемонструвало значні переваги матеріалу ДК2 порівняно з АК.UR-03. Під час стискання ДК2 показав максимальну міцність 209 МПа та відносну деформацію 12,5% при навантаженні 30 кН, тоді як АК.UR-03 продемонстрував міцність 170 МПа та відносну деформацію 43%. Такі результати вказують на доцільність використання матеріалу ДК2 в конструкціях, що вимагають високої міцності та мінімальної деформації під навантаженням. Для подальшого покращення експлуатаційних характеристик матеріалу ДК2 рекомендується впровадження дисперсних наповнювачів, що дозволить значно знизити пористість і збільшити термін експлуатації композиту в реальних умовах. Подальші дослідження, спрямовані на

вивчення інших експлуатаційних характеристик матеріалу ДК2, дадуть змогу оптимізувати його застосування в інженерних системах і підвищити надійність захищених конструкцій.

Acknowledgements

This research was carried out within the framework of the joint project «Development of technology for the protection and restoration of hydropower equipment with the latest domestic composite materials» under grant number 01DK24021, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine and the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF). The project is being implemented as part of a measure to support joint Ukrainian-German research projects for implementation in 2024-2025.

Перелік використаних джерел

- [1] Flexible polyurethane foam. I. FTIR analysis on residual isocyanate / Cole K.C., Gheluwe P. Van, Hébrard M.J., Leroux J. *Journal of Applied Polymer Science*. 1987. Vol. 34. No. 1. Pp. 395-407. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1987.070340131>.
- [2] Mechanism of the stabilization of flexible polyether polyurethane foams by silicone-based surfactants / G.R. Rossmly et al. *Journal of Cellular Plastics*. 1981. Vol. 17. No. 6. Pp. 319-327. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021955X8101700602>.
- [3] Enhanced mechanical and thermal properties of rigid polyurethane foam composites containing graphene nanosheets and carbon nanotubes / D. Yan et al. *Polymer International*. 2012. Vol. 61. No. 7. Pp. 1107-1114. DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.4188>.
- [4] A Study on Polyurethane Hybrid Nanocomposite Foams Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes and Silica Nanoparticles / Navidfar A., Sancak A., Yildirim K.B., Trabzon L. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2018. Vol. 57. No. 14. Pp. 1463-1473. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1410834>.
- [5] Navidfar A., Trabzon L. Graphene type dependence of carbon nanotubes/graphene nanoplatelets polyurethane hybrid nanocomposites: Micromechanical modeling and mechanical properties. *Composites Part B*:

- Engineering*. 2019. Vol. 176. 107337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107337>.
- [6] Multi-scale modeling in thermal conductivity of Polyurethane incorporated with Phase Change Materials using Physics-Informed Neural Networks / B. Liu et al. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 220. Article 119565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119565>.
- [7] Woods G. The ICI polyurethanes handbook. 2-nd ed. New York: John Wiley&Sons, 1990. 362 p.
- [8] Fiore V., Bella G. Di, Valenza A. The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 68. Pp. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025>.
- [9] Марчук Р., Мнацаканов Р. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. *Problems of Friction and Wear*. 2023. С. 55-62. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17359](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17359).
- [10] Аналіз стану досліджень полімерних композитних матеріалів в Україні та світі / С.А. Федосов та ін. *Наукові нотатки*. 2021. № 72. С. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.4>.
- [11] Іщенко А., Підплетний В. Ремонт прокатного обладнання металополімерних матеріалів. *Прокатне виробництво*. 2000. № 6. С. 25-27.
- [12] Іщенко А., Рассохін Д., Носовська О. Відновлення прокатного обладнання за допомогою композитних матеріалів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія : Технічні науки*. 2023. № 46. С. 55-61. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288125>.
- [13] Exploitation of Arundo donax L. hydrolysis residue for the green synthesis of flexible polyurethane foams / J. Bernardini et al. *BioResources*. 2017. Vol. 12, no. 2. Pp. 3630-3655. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3630-3655>.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF DOMESTIC COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYURETHANE

Ishchenko A.O.	D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6189-7830 , e-mail: ishchenko50@ukr.net ;
Devin L.M.	D.Sc. (Engineering), professor, director of the Educational center of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – V.M. Bakul Institute for superhard materials of the National academy of sciences of Ukraine, head of the laboratory for tool reliability of superhard materials, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1452-9904 , e-mail: ldevin350@gmail.com ;
Rassokhin D.O.	PhD (Engineering), associate professor, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3479-9485 , e-mail: Dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de ;
Nosovska O.V.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1313-4767 , e-mail: nosovska_o_v@pstu.edu ;
Kapustin S.V.	postgraduate student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4204-8449 , e-mail: stanislav.kapustin.engineer@gmail.com ;
Böhm R.	D.Sc. (Engineering), professor, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7768-4592 , e-mail: robert.boehm.1@htwk-leipzig.de

The article presents the results of a comparative analysis of the physical and mechanical properties of two domestic composite materials based on polyurethane - DK2 (developed by Priazovsky State Technical University) and AK.UR-03 (manufactured by Kapitel, Dnipro). The study is aimed at determining the ultimate compressive strength of materials and assessing their deformability, which is a critical factor in the selection of materials for the protection of equipment operating under high loads. Particular attention is also paid to the analysis of the porosity of materials as one of the key parameters affecting their durability and performance. Experimental tests were conducted on a 10-ton hydraulic press with a gradual increase in load. The change in the thickness of the samples at each stage was measured to calculate the degree of deformation and stresses. The results showed that the DK2 material demonstrates higher strength (209 MPa vs. 170 MPa for AK.UR-03) and significantly lower relative strain (12.5 % vs. 43 %, respectively). This indicates the feasibility of its use in structures where strength and dimensional stability under load are critical. In addition to the mechanical analysis, the porosity of the materials was studied using a 3D macroscope after their destruction in the cooled state. For the DK2 material, 977 pores were found, which occupied about 9.79 % of the surface area of the studied surface. The cause of pore formation was determined to be a chemical reaction between isocyanates and humidity, which results in the release of carbon dioxide, creating microbubbles in the polymer structure. Methods of reducing porosity, including the introduction of dispersed fillers (graphite,

copper oxide), which can bind CO₂, improving the homogeneity of the structure and strength of the composite, have been proposed. The practical significance of the results lies in the possibility of effective use of the DK2 material in the mining, metallurgical, mechanical engineering, and energy industries to restore and protect equipment operating under heavy loads and aggressive environments. The work also opens up prospects for further research to improve the performance of polymer composites by modifying their structure and composition.

Keywords: polyurethane composites, compressive strength, porosity, deformation, dispersed fillers, materials science, polymer matrix.

References

- [1] K.C. Cole, P. Van Gheluwe, M.J. Hébrard, and J. Leroux, «Flexible polyurethane foam. I. FTIR analysis on residual isocyanate», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 34, no. 1, pp. 395-407, 1987. doi: **10.1002/app.1987.070340131**.
- [2] G. R. Rossmly, H. J. Kollmeier, W. Lidy, H. Schator, and M. Wiemann, «Mechanism of the stabilization of flexible polyether polyurethane foams by silicone-based surfactants», *Journal of Cellular Plastics*, vol. 17, no. 6, pp. 319-327, 1981. doi: **10.1177/0021955X8101700602**.
- [3] D. Yan, L. Xu, C. Chen, J. Tang, X. Ji, and Z. Li, «Enhanced mechanical and thermal properties of rigid polyurethane foam composites containing graphene nanosheets and carbon nanotubes», *Polymer International*, vol. 61, no. 7, pp. 1107-1114, 2012. doi: **10.1002/pi.4188**.
- [4] A. Navidfar, A. Sancak, K. B. Yildirim, and L. Trabzon, «A study on polyurethane hybrid nanocomposite foams reinforced with multiwalled carbon nanotubes and silica nanoparticles», *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 57, no. 14, pp. 1463-1473, 2018. doi: **10.1080/03602559.2017.1410834**.
- [5] A. Navidfar and L. Trabzon, «Graphene type dependence of carbon nanotubes/graphene nanoplatelets polyurethane hybrid nanocomposites: Micromechanical modeling and mechanical properties», *Composites Part B: Engineering*, vol. 176, pp. 107337, 2019. doi: **10.1016/j.compositesb.2019.107337**.
- [6] B. Liu, Y. Wang, T. Rabczuk, T. Olofsson, and W. Lu, «Multi-scale modeling in thermal conductivity of polyurethane incorporated with phase change materials using physics-informed neural networks», *Renewable Energy*, vol. 220, article 119565, 2024. doi: **10.1016/j.renene.2023.119565**.
- [7] G. Woods, *The ICI Polyurethanes Handbook*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [8] V. Fiore, G. Di Bella, and A. Valenza, «The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites», *Composites Part B: Engineering*, vol. 68, pp. 14-21, 2015. doi: **10.1016/j.compositesb.2014.08.025**.
- [9] R. Marchuk, and R. Mnatsakanov, «Analiz polimernykh kompozytsiynykh materialiv dlia pidshypnykh kovzannia» [«Analysis of polymer composite materials for sliding bearings»], *Problems of Friction and Wear*, pp. 55-62, 2023. doi: **10.18372/0370-2197.1(98).17359**. (Ukr.)
- [10] S.A. Fedosov, Yu.O. Odarchuk, V.Ye. Sakhniuk, D.A. Zakharchuk, and O. M. Vilihurskyi, «Analiz stanu doslidzhen polimernykh kompozytnykh materialiv v Ukraini ta sviti» [«Analysis of the state of research of polymeric composite materials in Ukraine and the world»], *Naukovi Notatky*, no. 72, pp. 23-29, 2021. doi: **10.36910/775.24153966.2021.72.4**. (Ukr.)
- [11] A. Ishchenko, and V. Pidpletnyi, «Remont prokatnoho obladnannia metalopolimernykh materialiv» [«Remont prokatnoho obladnannia metalopolimernykh materialiv»], *Prokatne vyrobnytstvo – Rolling Production*, no. 6, pp. 25-27, 2000. (Ukr.)
- [12] A. Ishchenko, D. Rassokhin, and O. Nosovska, «Vidnovlennia prokatnoho obladnannia za dopomohoiu kompozytnykh materialiv» [«Restoration of rolled equipment using composite materials»], *Visnyk Pryazov'skoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, no. 46, pp. 55–61, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288125**. (Ukr.)
- [13] J. Bernardini et al., «Exploitation of Arundo donax L. hydrolysis residue for the green synthesis of flexible polyurethane foams», *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 3630-3655, 2017. doi: **10.15376/biores.12.2.3630-3655**.

Стаття надійшла 14.04.2025

Стаття прийнята 03.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Порівняльний аналіз характеристик міцності вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі / А.О. Іщенко та ін. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 50. С. 96-102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336272>.

136 МЕТАЛУРГІЯ

UDC 669.1:338.45:504.06

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336308

STRATEGIC MODERNIZATION OF PJSC «ZAPORIZHSTAL» FOR DECARBONIZATION AND ADAPTATION TO CBAM REQUIREMENTS

Tymoshenko D.O.	Master's degree candidate, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2477-3310 , e-mail: daniil.tymoshenko@mipolytech.education ;
Kukhar V.V.	doctor of technical sciences, professor, vice-rector for R&D work, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4863-7233 , e-mail: kvv.mariupol@gmail.com ;
Navolniev Ig.Yu.	PhD student, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0477-7522 , e-mail: i.navolniev@gmail.com ;
Malii Kh.V.	candidate of technical sciences, associate professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education ;
Buturlin O.S.	master's degree candidate, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, e-mail: oleh.buturlin@mipolytech.education

In the context of the global fight against climate change and the tightening of regulatory restrictions, such as the introduction of the European Union's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), Ukrainian metallurgical enterprises face serious challenges that require urgent solutions. For PJSC «Zaporizhstal» these challenges manifest in the need not only to reduce CO₂ emissions but also to comply with new international environmental standards, which is critical for maintaining the competitiveness of their products in global markets. This article provides a comprehensive analysis of both economic and environmental risks associated with greenhouse gas emissions at PJSC «Zaporizhstal». The authors explore potential modernization pathways aimed at reducing the carbon footprint and improving environmental performance. Special attention is given to the implementation of advanced technologies such as Direct Reduced Iron (DRI) and Electric Arc Furnaces (EAF), which are promising solutions for the decarbonization of metallurgical production. The article presents the results of a detailed benchmarking of CO₂ emissions at PJSC «Zaporizhstal» compared to European producers. The dynamics of metal product production, particularly hot-rolled coil (HRC), are analyzed, and changes in the margin of this product after the implementation of modernization measures are assessed. The economic feasibility of investments in «green» metallurgy technologies, which provide not only environmental efficiency but also economic benefits for the enterprise, is emphasized. The research results demonstrate that strategic modernization of PJSC «Zaporizhstal» is a key factor for ensuring the long-term sustainable development of the enterprise. Modernization will contribute to job preservation, increased productivity, and competitiveness of the enterprise in the international market. Additionally, adaptation to the requirements of the «green» transition will enable Ukrainian metallurgy to successfully integrate into global supply chains that consider environmental responsibility as a key criterion for evaluating production efficiency.

Keywords: CBAM, PJSC «Zaporizhstal», CO₂ emissions, modernization, direct reduction iron, electric arc furnaces, «green» steel, sustainable development, energy efficiency.

Statement of the problem

Global warming and related climate changes are prompting the global community to take active measures towards the decarbonization of the economy. The European Union is taking a leading role in this process by implementing a set of tools to reduce the carbon footprint of products and the environmental burden on ecosystems. One such mechanism is the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), which introduces a carbon duty for importers of products with a high level of greenhouse gas emissions, including steel, aluminum, and cement. The

introduction of this mechanism was preceded by extensive consultations, analytical studies, and preparatory work [1-3].

The current version of the CBAM provides for a transitional period starting from October 1, 2023, during which importers must report emissions associated with imported products, with the actual duty to be introduced from January 1, 2026. Initially, the CBAM will apply to a limited range of goods but may be expanded in the future. This creates new challenges for Ukrainian exporters, particularly for metallurgical enterprises whose products traditionally have a significant carbon footprint [4, 5].

In this context, PJSC «Zaporizhstal», one of the largest Ukrainian metallurgical enterprises oriented towards European markets, must adapt to the new regulatory conditions to maintain its competitive advantages and ensure sustainable development. The introduction of the CBAM mechanism threatens the competitiveness of the plant, as its products may lose attractiveness to European consumers due to high CO₂ emissions. Therefore, adapting the enterprise to the CBAM requirements is an urgent task, the resolution of which depends on its further functioning and the preservation of jobs.

Thus, the study aims to justify the technological transformation of PJSC «Zaporizhstal» in response to CBAM requirements by analyzing emission-related risks, assessing modernization scenarios, and evaluating their impact on the enterprise's competitiveness and sustainability.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

In analyzing current trends in the development of the metallurgical complex in well-known studies [6], the following key directions for its further evolution were identified: modernization of traditional blast furnace and converter production through innovative solutions; transition to electric arc furnaces (EAF); development of direct reduction of iron ore (DRI) technologies, including the use of hydrogen as a reducing agent; improvement of energy efficiency and decarbonization of production; implementation of circular economy principles, including increased recycling of steel scrap; and digitalization and implementation of Industry 4.0 approaches in metallurgical enterprises.

As noted in [7, 8], the metallurgical sector plays a significant role in the carbon footprint of the entire industrial complex, necessitating rapid transformation towards climate neutrality. Innovations in «green» metallurgy and hydrogen technologies are becoming particularly relevant. Projects involving the use of hydrogen to reduce iron ores (hydrogen-based DRI), implementation of carbon capture and storage technologies (CCS/CCUS), as well as advanced electric smelting units are being actively explored and tested in leading metallurgical countries.

Moreover, it is important to consider not only technical feasibility but also the economic and infrastructural conditions for the implementation of such transformations, particularly for enterprises operating in transition economies.

Purpose and task statement

The objective of this study is to provide a comprehensive justification for the technological transformation of a large metallurgical enterprise in the context of the transition to low-carbon production. This is achieved through the analysis of CO₂ emission levels, assessment of energy

consumption in current and prospective production processes (particularly DRI and EAF technologies), comparison of their efficiency with European counterparts, development of a step-by-step decarbonization roadmap, and economic forecasting of modernization outcomes, taking into account the requirements of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), investment feasibility, and the impact on product competitiveness in international markets.

Materials and methods

This study utilizes various sources of information, including:

- actual data on CO₂ emissions at PJSC «Zaporizhstal»;
- annual reports and public materials of the company;
- scientific publications and analytical reviews dedicated to the CBAM mechanism and issues of decarbonization in the metallurgical industry.

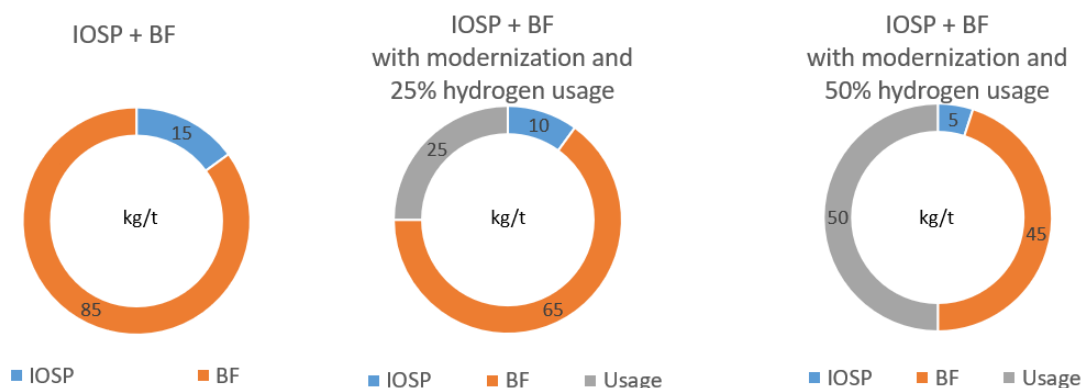
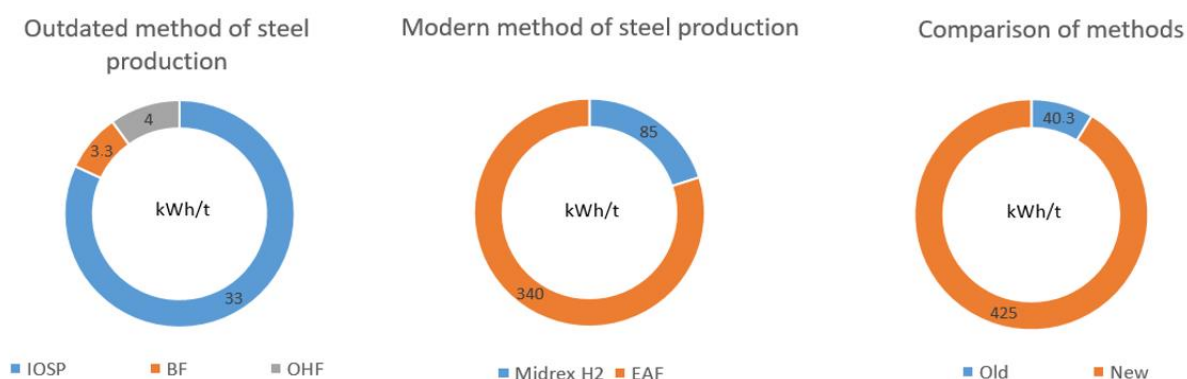
For data analysis and processing, the following methods were applied:

- system analysis – to identify the interrelationships between factors affecting CO₂ emissions;
- economic and statistical modeling – to assess the economic feasibility of various technical modernization options;
- expert evaluation method – to account for qualitative factors that are difficult to formalize.

Summary of the main material

The benchmarking of CO₂ emissions (fig. 1) revealed that the emission levels at PJSC «Zaporizhstal» exceed those of similar enterprises in EU countries. The main reason for this is the use of outdated technological processes, particularly the open-hearth steelmaking method, which has significantly higher carbon intensity compared to electric arc or converter (BOF) methods [9]. In the context of the CBAM mechanism, this creates additional threats to the export capacity of the enterprise and highlights the urgent need for production modernization.

The analysis showed that replacing open-hearth furnaces (OHF) with electric arc furnaces (EAF) combined with the implementation of direct reduced iron (DRI) technology significantly reduces CO₂ emissions. DRI technology involves the reduction of iron from iron oxides (usually in the form of iron ore) using natural gas or hydrogen, without melting the ore. Particularly effective from an environmental standpoint is the use of hydrogen as a reducing agent, which allows for the production of so-called «green» pig iron with a minimal carbon footprint [10]. EAF, unlike open-hearth furnaces, operate on electrical energy instead of fossil fuels, which also contributes to the reduction of overall greenhouse gas emissions.

Fig. 1 – Dynamics of CO₂ emission reduction due to the modernization of the iron ore sintering plant (IOSP) and blast furnaces (BF)Fig. 2 – Comparative analysis of energy consumption for steel production using different technologies (Old = IOSP + BF + OHF; New = Midrex H₂ + EAF)

The benchmarking conducted (fig. 2) allowed for the comparison of the energy efficiency of key production technologies in metallurgy: the sintering section with an aspiration system, open-hearth furnace, Midrex H₂ DRI technology, and EAF. The results confirmed significant differences in energy consumption levels between traditional and low-carbon technologies [11, 12].

In previous studies, it was found that the specific energy consumption of the sintering plant is approximately 33 kWh/t, the blast furnace – 3.3 kWh/t, the open-hearth furnace – 4 kWh/t, Midrex H₂ – 85 kWh/t, and the electric arc furnace (EAF) – 340 kWh/t [9, 11]. A comparative analysis of different steel production methods revealed significant differences in their energy consumption levels. The traditional open-hearth process is less energy-efficient compared to modern EAF, but it is still used for the production of certain steel grades [11], particularly due to the technological inertia of enterprises.

The analysis showed that the Midrex H₂ technology, despite its high energy intensity, is a promising alternative to traditional steel production methods due to its significant reduction in CO₂ emissions. This is particularly relevant in the context of tightening environmental requirements. EAF, although characterized by relatively high energy consumption, have several advantages – including the

flexibility of the production process and efficiency in recycling scrap metal. A comparative assessment of the energy efficiency of different technological approaches revealed significant differences between outdated methods (sintering and blast furnace production, open-hearth furnaces) and modern solutions such as Midrex H₂ and EAF. The implementation of the latter plays a key role in the decarbonization of the steel industry, contributing to the reduction of the carbon footprint and the overall energy efficiency of production [13, 14].

Therefore, the results of the analysis of steel production technologies used at PJSC «Zaporizhstal» indicate an urgent need to modernize production facilities to achieve environmental goals and maintain competitiveness in the international market. The transition from outdated open-hearth furnaces to modern electric arc furnaces, combined with the implementation of DRI technology, is considered a promising development direction that will significantly reduce CO₂ emissions and increase production energy efficiency. To maintain the competitiveness of the enterprise in the context of the «green» transition, production modernization is extremely necessary. This will allow compliance with international environmental standards, increase energy efficiency, and ensure the proper quality of products.

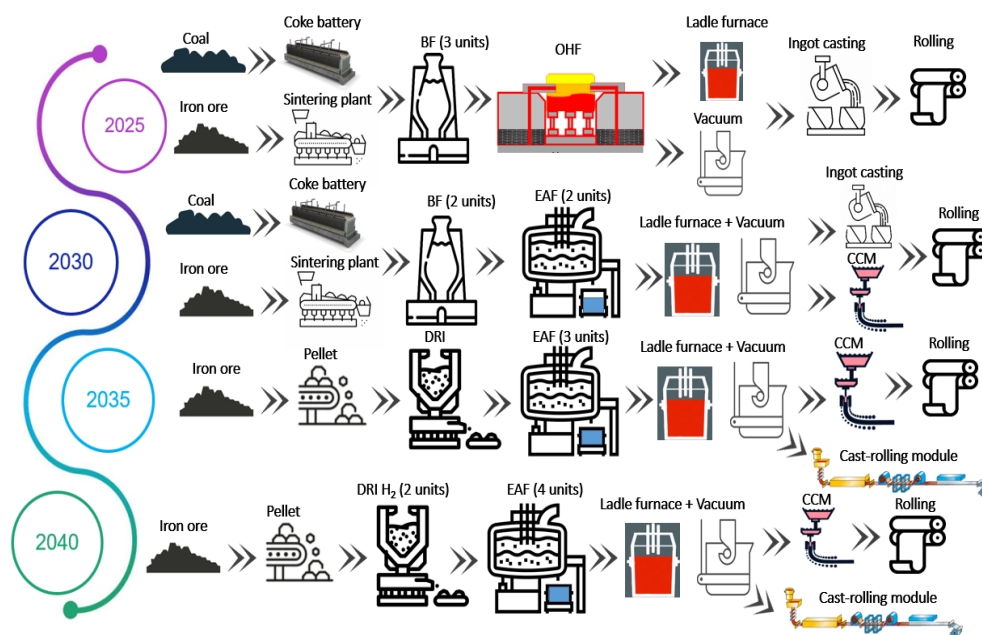


Fig. 3 – Roadmap for the phased decarbonization of metallurgical production

As a result of the analysis, a clear phased decarbonization plan was developed, presented in fig. 3.

This roadmap involves the gradual reduction of CO₂ emissions through the implementation of innovative technologies and energy-efficient solutions, similar to the breakthrough approaches realized under the ULCOS program in the EU [15, 16]. The phased approach allows for the rational distribution of capital expenditures (CAPEX) over time, reducing the financial burden on the enterprise.

Key stages of decarbonization include:

- Replacement of OHF with EAF – to significantly reduce CO₂ emissions and improve steel quality.
- Implementation of DRI technology using natural gas as an intermediate solution – this reduces dependence on fossil fuels and creates prerequisites for the subsequent transition to «green» hydrogen.
- Gradual transition to «green» hydrogen in DRI processes – as a long-term goal to minimize the carbon footprint.
- Implementation of energy-saving technologies and heat recovery systems to reduce energy consumption and increase economic efficiency.
- Integration of digital technologies – to optimize production processes and continuously monitor CO₂ emissions. The implementation of such a decarbonization roadmap will help Ukrainian metallurgical enterprises adapt to new environmental requirements, maintain their competitiveness, and ensure the sustainable development of the industry.

The implementation of technologies according to the decarbonization roadmap will not only reduce CO₂ emissions but also optimize production processes and expand the product range. In particular, PJSC «Zaporizhstal» can focus on the production of high-margin hot-rolled coil

(HRC), which is characterized by stable demand in the global market and strategic importance for several industries.

The results of the production potential analysis confirmed the feasibility of installing a continuous casting machine (CCM) at PJSC «Zaporizhstal» as a strategic stage of modernization. The implementation of this project will allow the enterprise to respond flexibly to market demand, expand the product range by producing billets for further rolling at other Metinvest Group assets – particularly at European rolling facilities – and ensure diversification and increased production efficiency [16].

The forecasted dynamics of metal product production at PJSC «Zaporizhstal» after the implementation of the decarbonization roadmap (fig. 4) show expected stable growth in the output of hot-rolled coil (HRC), which, in turn, indicates the anticipated effectiveness of the chosen modernization strategy.

Taking into account the projected energy consumption and the requirements of the CBAM mechanism, a macro forecast for the development of PJSC «Zaporizhstal» has been formulated (fig. 5).

The calculation results demonstrate a stable average margin level for hot-rolled coil (HRC) at approximately USD 410 per ton, even considering the additional burden of the CBAM carbon tax. This indicates the relative resilience of the company's business model and the effectiveness of the proposed modernization strategy.

The implementation of the decarbonization roadmap allows PJSC «Zaporizhstal» not only to reduce its carbon footprint but also to ensure high production profitability in the long term. The forecasted dynamics of metal production indicate a positive impact of modernization on production volumes and overall efficiency.

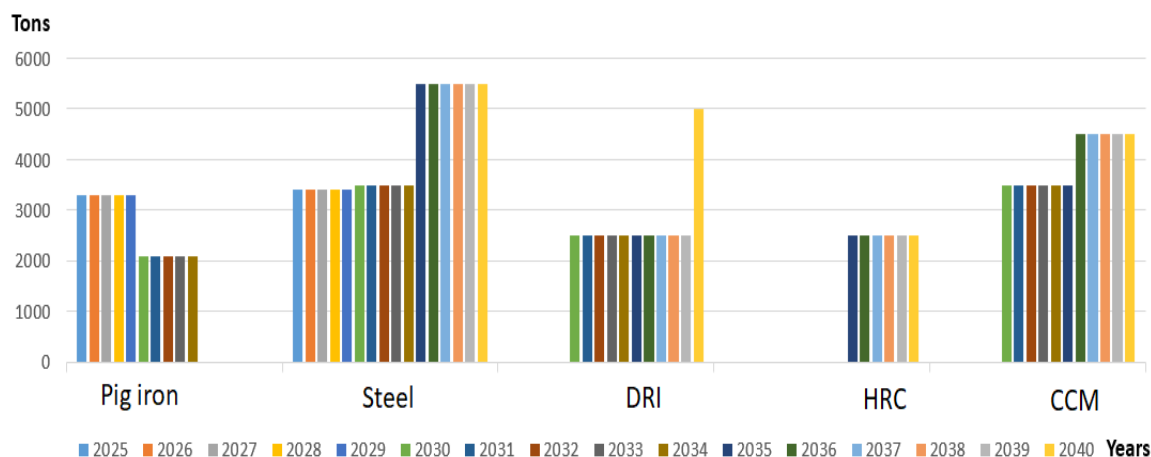


Fig. 4 – Forecasted dynamics of metal product production volumes at PJSC «Zaporizhstal» by year



Fig. 5 – Macroeconomic forecast of profit margins in metal production

The economic efficiency calculation showed that production modernization is economically feasible despite significant capital expenditures. The reduction in energy costs and the carbon tax offsets the investments in modernization over the long term.

Conclusions

The conducted research confirmed that the modernization of PJSC «Zaporizhstal» is a critically important task for maintaining the company's competitiveness in the context of global decarbonization and the implementation of the CBAM carbon tax. The study established that the introduction of new technologies, including the transition to electric arc furnaces (EAF), the use of direct reduced iron (DRI) technology with hydrogen, and the integration of digital solutions, will significantly reduce CO₂ emissions to 613 kg per ton of steel. This meets modern EU

environmental requirements and contributes to increased production energy efficiency.

Economic analysis showed that even with additional costs for the carbon tax, the average margin for hot-rolled coil (HRC) remains stable at USD 410 per ton, indicating the effectiveness of the company's business model post-modernization.

The proposed decarbonization roadmap involves phased emission reductions and a balanced distribution of capital investments, estimated at USD 10 billion, which reduces financial pressure on the company. The implementation of these measures will increase production capacity to 7 million tons of steel per year, ensure sustainable development, preserve jobs, and strengthen PJSC «Zaporizhstal's» position in the global market.

Thus, the modernization of PJSC «Zaporizhstal» is a strategic investment in the future of Ukrainian metallurgy, which will contribute to achieving the goals of the «green» transition and enable the company to make a significant

contribution to combating climate change. Successful project implementation requires state support in the form of preferential loans, tax incentives, and attracting investments for innovative projects, all of which will help integrate Ukrainian industry into the European economy.

References

- [1] B.I. Basok, Ye.T. Bazeyev, and I.V. Kurayeva, «Hlobalne poteplinnia — fizyka i heopolityka (ohliad). 2. Polityka poslablennia nehatyvnoho vplyvu zmin klimatu ta adaptatsii do nykh» [«Global warming – physics and geopolitics (review). 2. Policies to mitigate the negative impact of climate change and adapt to it»], *Teplofizyka ta teploenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 30-40, 2021. doi: **10.31472/ttpe.2.2021.4**. (Ukr.)
- [2] L. Naziuta, and D. Stepanenko, «Na shliakhu do dekarbonizatsii svitovoi ekonomiky. Hlobalne poteplinnia. Klimatychni konferentsii OON» [«On the path to decarbonizing the global economy. Global warming. UN climate conferences»], *Visnyk Pryazov'skoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Pryazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, no. 45, pp. 97-108, 2022. doi: **10.31498/2225-6733.45.2022.276242**. (Ukr.)
- [3] H. Myskiv, and R. Ivanytskyi, «Decarbonization as a Key to Sustainable Development: Challenges and Prospects of the EU and Ukraine», *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, vol. 3 (56), pp. 365–381, 2024. doi: **10.55643/fcaptop.3.56.2024.4397**.
- [4] A. Kasych and Y. Babych, «Zovnishnii aspekt analizu eksportnoho potentsialu metalurhiinykh pidpriemstv Ukrainy» [«External Aspect of Analysis of Export Potential of Metallurgical Enterprises of Ukraine»], *Investytsiyi: Praktyka ta Dosvid*, no. 3, pp. 26-31, 2020. doi: **10.32702/2306-6814.2020.3.26**. (Ukr.)
- [5] N. Levchenko, G. Shyshkanova, G. Abuselidze, Y. Zelenin, V. Prykhodko, and M. Kovalskyi, «Global Trends of Decarbonisation as a Determining Factor for the Development of External Economic Activity of Metallurgical Enterprises», *Rural Sustainability Research*, vol. 47, no. 342, pp. 62-70, 2022. doi: **10.2478/plua-2022-0008**.
- [6] L.H. Luboltsev, O. L. Chaika, and O. I. Babachenko, «Perspektyvy rozvytku metalurhiinoho vyrobnytstva v Ukraini za rakhunok vykorystannia novykh tekhnologii» [«Prospects of Technological Development of Metallurgical Production in Ukraine Due to the Use of New Technologies»], *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, iss. 37, pp. 4-25, 2023. doi: **10.52150/2522-9117-2023-37-4-25**. (Ukr.)
- [7] A.V. Narivskiy, O.M. Smirnov, and S.M. Tymoshenko, «Steel production in Ukraine: current state and prospects (review)», *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 30, no. 3(330), pp. 28-43, 2022. doi: **10.15407/steelcast2022.03.028**.
- [8] L.H. Tuboltsev, O.Ye. Merkulov, A.H. Pryhunova, and A.V. Naryvskiy, «Kontseptsiiia staloho rozvytku chornoi metalurhii Ukrainy v suchasnykh umovakh» [«The Concept of Sustainable Development of Ferrous Metallurgy of Ukraine under Current Conditions»], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 30, no. 4(331), pp. 8-19, 2022. doi: **10.15407/steelcast2022.04.008**. (Ukr.)
- [9] D.O. Tymoshenko, V.V. Kukhar, and I.V. Volovenko, «Porivniannia enerhospozhyvannia pry vyrobnytstvi stali zastarilomyi ahlodomennym ta martenivskym peredilamy iz suchasnoiu tekhnologiiu priamoho vidnovlennia zaliza MIDREX H2 ta vyplavkoiu v duhovii staleplyvnyii pechi» [«Comparison of Energy Consumption in Steel Production by Outdated Sinter-Blast Furnace and Open-Hearth Processes with Midrex H2 Modern Technology of Direct Iron Reduction and Smelting in an Arc Furnace»], *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, no. 2, pp. 49-54, 2024. doi: **10.32782/3041-2080/2024-2-8**. (Ukr.)
- [10] M. Chepeliev, «Possible Implications of the European Carbon Border Adjustment Mechanism for Ukraine and Other EU Trading Partners», *Energy Research Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, 2021. doi: **10.46557/001c.21527**.
- [11] V.V. Kukhar, D.O. Tymoshenko, D.V. Kononiuk, Kh.V. Malii, and I.Yu. Navolniev, «Domenni pechi v epokhu dekarbonizatsii: poshuk alternatyv koksu» [«Blast furnaces in the era of decarbonization: searching for coke alternatives»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (Tekhnichni nauky) – Collection of Scientific Papers of Dnipro State Technical University (Technical Sciences)*, thematic issue: *Do 95-richchia kafedry metalurhii imeni profesora V.I. Lohinova Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu* [To the 95th Anniversary of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov of Dnipro State Technical University], no. 1, pp. 36-44, 2024. doi: **10.31319/2519-2884.tm.2024.3**. (Ukr.)
- [12] J. Song, Z. Jiang, C. Bao, and A. Xu, «Comparison of Energy Consumption and CO₂ Emission for Three Steel Production Routes», *Metals*, vol. 9, article 364, 2019. doi: **10.3390/met9030364**.
- [13] A. Neacsu, C. N. Eparu, and D. B. Stoica, «Hydrogen–Natural Gas Blending in Distribution Systems: An Energy, Economic, and Environmental Assessment», *Energies*, vol. 15, no. 17, article 6143, 2022. doi: **10.3390/en15176143**.
- [14] V. Venger and S. Shumska, «Metalurhiina haluz Ukrainy: dynamika vyrobnytstva kriz pryzmu zovnishnikh faktoriv» [Metallurgical Industry of Ukraine: Production Dynamics through the Prism of

- External Factors], *Economic Forecasting*, no. 1, pp. 7-31, 2021. doi: 10.15407/eip2021.01.007. (Ukr.)
- [15] Y. Junjie, «Progress and Future of Breakthrough Low-Carbon Steelmaking Technology (ULCOS) of EU», *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 3, no. 2, pp. 15-22, 2018. doi: 10.11648/j.ijmpem.20180302.11.
- [16] K. Meijer, M. Denys, J. Lasar, J.-P. Birat, G. Still, and B. Overmaat, «ULCOS: Ultra-Low CO₂ Steelmaking», *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 36, no. 4, pp. 249–251, 2009. doi: 10.1179/174328109X439298.

СТРАТЕГІЧНА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА АДАПТАЦІЇ ДО ВИМОГ СВМ

Тимошенко Д.О.	магістр, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2477-3310 , e-mail: daniil.tymoshenko@mipolytech.education ;
Кухар В.В.	д-р техн. наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4863-7233 , e-mail: kvv.mariupol@gmail.com ;
Навольнєв І.Ю.	аспірант, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0477-7522 , e-mail: i.navolnjev@gmail.com ;
Малий Х.В.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education ;
Бутурлін О.С.	магістр, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, e-mail: oleh.buturlin@mipolytech.education

В контексті глобальної боротьби зі зміною клімату та посилення регуляторних обмежень, таких як впровадження Механізму коригування вуглецевих викидів на кордоні Європейського Союзу (СВМ), українські металургійні підприємства стикаються із серйозними викликами, які потребують термінових рішень. Для ПАТ «Запоріжсталь» ці виклики проявляються у необхідності не лише скоротити викиди CO₂, а й відповідати новим міжнародним екологічним стандартам, що є критично важливим для збереження конкурентоспроможності їх продукції на світових ринках. У статті здійснено всебічний аналіз економічних та екологічних ризиків, пов'язаних із викидами парникових газів на ПАТ «Запоріжсталь». Автори досліджують можливі шляхи модернізації, спрямовані на зменшення вуглецевого сліду та покращення екологічних показників. Особливу увагу приділено впровадженню передових технологій, таких як пряме відновлення заліза і дугові сталеплавильні печі, які є перспективними рішеннями для декарбонізації металургійного виробництва. У статті наведено результати детального порівняльного аналізу викидів CO₂ на ПАТ «Запоріжсталь» у порівнянні з європейськими виробниками. Проаналізовано динаміку виробництва металургійної продукції, зокрема гарячекатаного прокату (в рулонах), а також оцінено зміни маржинальності цього продукту після реалізації заходів модернізації. Наголошується на економічній доцільності інвестицій у технології «зеленої» металургії, які забезпечують не лише екологічну ефективність, але й економічну вигоду для підприємства. Результати дослідження демонструють, що стратегічна модернізація ПАТ «Запоріжсталь» є ключовим фактором забезпечення довгострокового сталого розвитку підприємства. Модернізація сприятиме збереженню робочих місць, підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності підприємства на міжнародному ринку. Крім того, адаптація до вимог «зеленої» трансформації дозволить українській металургії успішно інтегруватися у глобальні ланцюги постачання, які розглядають екологічну відповідальність як ключовий критерій оцінки ефективності виробництва.

Ключові слова: СВМ, ПАТ «Запоріжсталь», викиди CO₂, модернізація, пряме відновлення заліза, дугові сталеплавильні печі, «зелена» сталь, сталий розвиток, енергоефективність.

Перелік використаних джерел

- [1] Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Кураєва І.В. Глобальне потепління – фізика і геополітика (огляд). 2. Політика послаблення негативного впливу змін клімату та адаптації до них. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. Т. 43, № 2. С. 30-40. DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.4>.
- [2] Назюта Л.Ю., Степаненко Д.В. На шляху до декарбонізації світової економіки. Глобальне потепління. Кліматичні конференції ООН. *Вісник*

- Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2022. № 45. С. 97-108. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276242>.*
- [3] Myskiv H., Ivanytskyi R. Decarbonization as a Key to Sustainable Development: Challenges and Prospects of the EU and Ukraine. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*. 2024. Vol. 3(56). Pp. 365-381. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.3.56.2024.4397>.
- [4] Касич А.О., Бабич Ю.А. Зовнішній аспект аналізу експортного потенціалу металургійних підприємств України. *Інвестиції: практика та досвід*. 2020. № 3. С. 26-31. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2020.3.26>.
- [5] Global Trends of Decarbonisation as a Determining Factor for the Development of External Economic Activity of Metallurgical Enterprises / N. Levchenko et al. *Rural Sustainability Research*. 2022. Vol. 47, no. 342. Pp. 62-70. DOI: <https://doi.org/10.2478/plua-2022-0008>.
- [6] Тубольцев Л.Г., Чайка О.Л., Бабченко О.І. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 4-25. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>.
- [7] Narivskyi A.V., Smirnov O.M., Tymoshenko S.M. Steel production in Ukraine: current state and prospects (review). *Метал та лиття України*. 2022. Vol. 30, no. 3(330). Pp. 28-47. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.028>.
- [8] Концепція сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах / Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Є., Пригунова А.Г., Наривський А.В. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30, № 4 (331). С. 8-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.008>.
- [9] Тимошенко Д.О., Кухар В.В., Воловченко І.В. Порівняння енергоспоживання при виробництві сталі застарілими аглодоменним та мартенівським процесами із сучасною технологією прямого відновлення заліза MIDREX H2 та виплавкою в дуговій сталеплавильній печі. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. № 2. С. 49-54. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-8>.
- [10] Chepeliev M. Possible Implications of the European Carbon Border Adjustment Mechanism for Ukraine and Other EU Trading Partners. *Energy Research Letters*. 2021. Vol. 2, no. 1. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.46557/001c.21527>.
- [11] Доменні печі в епоху декарбонізації: пошук альтернатив коксу / В.В. Кухар та ін. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (Технічні науки)*. Тематичний випуск: До 95-річчя кафедри металургії імені професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету. 2024. № 1. С. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.3>.
- [12] Comparison of Energy Consumption and CO₂ Emission for Three Steel Production Routes / Song J., Jiang Z., Bao C., Xu A. *Metals*. 2019. Vol. 9. Article 364. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9030364>.
- [13] Neacsu A., Eparu C. N., Stoica D.B. Hydrogen–Natural Gas Blending in Distribution Systems – An Energy, Economic, and Environmental Assessment. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 17. Article 6143. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176143>.
- [14] Венгер В., Шумська С. Металургійна галузь України: динаміка виробництва крізь призму зовнішніх факторів. *Економічне прогнозування*. 2021. № 1. С. 7-31. DOI: <https://doi.org/10.15407/eip2021.01.007>.
- [15] Junjie Y. Progress and Future of Breakthrough Low-Carbon Steelmaking Technology (ULCOS) of EU. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. Vol. 3, no. 2. Pp. 15-22. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20180302.11>.
- [16] ULCOS: Ultra-Low CO₂ Steelmaking / K. Meijer et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009. Vol. 36, No. 4. Pp. 249-251. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328109X439298>.

Стаття надійшла 26.03.2025

Стаття прийнята 22.04.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Strategic modernization of PJSC «Zaporizhstal» for decarbonization and adaptation to cbam requirements / D.O. Tymoshenko et al. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336308>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АГЛОМЕРАЦІЇ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ВНУТРІШНЬОГО
ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОТИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ КАРТИНИ ПО ВИСОТІ ШАРУ

Чупринов Є.В.	канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: itchupa@gmail.com ;
Кассім Д.О.	д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Ляхова І.А.	канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7589-8351 , e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua ;
Зайцев Г.Л.	канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7909-9044 , e-mail: zaitsev@duet.edu.ua ;
Реков Ю.В.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТИНБЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0318-0168 , e-mail: yuriy.rekov@mipolytech.education

Виконаний аналіз вітчизняних і закордонних досліджень, які підтверджують неоднорідність розподілу теплоти в шарі агломераційної шихти. Проведена оцінка попередніх досліджень авторів, зроблений висновок, що потенціал подальших досліджень у цьому напрямку залишається значним. Досліджено вплив крупності та реакційної здатності твердого палива на процес агломерації залізорудної шихти. Експерименти проводилися в лабораторних умовах з використанням аглочаши діаметром 100 мм і висотою шару 300 мм. Методика передбачала роздільне введення палива у верхній та нижній шари шихти з метою оптимізації теплового режиму. Використано два види палива: високореакційне (коковий дріб'язок, CRI > 37%) та низькореакційне (антрацит, CRI < 37%). Додатково в шихту вводили пиловату фракцію (0-1 мм) для забезпечення внутрішнього джерела теплоти. Результати показали, що оптимальні показники досягаються при використанні високореакційного палива у верхньому шарі та низькореакційного у нижньому. Це дозволило підвищити продуктивність аглочаши з 1,15 до 1,46-1,48 т/м²-год, знизити витрату вуглецю з 52,3 до 50,8-51,3 кг/т, покращити міцність агломерату, зменшити вміст дріб'язку та залишкового вуглецю, а також підвищити вміст заліза.

Ключові слова: агломерат, тверде паливо, реакційна здатність, питома продуктивність, міцність.

Постановка проблеми

Технологія отримання залізорудного агломерату на українських аглофабриках передбачає завантаження шихти єдиним шаром середньої висоти близько 400 мм. В той час, багато досліджень і реальний промисловий досвід підтверджують суттєві недоліки такого методу, які полягають у недосконалої тепловій картини по висоті шару, що погіршує властивості готової продукції та знижує продуктивність агломашин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Як вітчизняні [1, 2], так і зарубіжні науковці [3-5] відзначають той факт, що верхній і нижній горизонти шару отримують різну кількість теплоти від згоряння в шарі твердого палива. Дослідження [6-10] показали, що верхньому шару не вистачає до 50% необхідної теплоти, в той же час нижній отримує до 70 % надлишкової теплоти. В попередніх роботах [11-13] авторів даної статті запропоновані технологічні рішення, які дозволяють вирішити дану проблему шляхом оптимізації параметрів спікання. Тим не менше, не всі можливості в цьому напрямку досліджені, а додаткова

технологічна варіативність стане корисною для українських агломераційних фабрик, що знаходяться в пошуку оптимальних технологічних умов.

Мета статті

Виконати дослідження та запропонувати технологічні рекомендації щодо спікання агломераційної шихти для покращення якості продукту і підвищення продуктивності процесу.

Виклад основного матеріалу

Методикою проведення роботи передбачалося, що кількість та фізико-хімічні характеристики залізорудної та флюсової складової у верхньому та нижньому шарах аглошихти у всіх випробуваннях були постійними.

Хімічний склад та теплотехнічні характеристики використовуваних твердих палив у шарах аглошихти також не змінювалися. Реакційна здатність кожного з видів палив у верхньому та нижньому шарах змінювалася у вузькому діапазоні значень. В якості палива з низькою реакційною здатністю використовували антрацит, а з високою реакційною здатністю – коковий дріб'язок.

Для проведення досліджень попередньо здійснювали підготовку двох видів твердого палива необхідної крупності: високореакційного ($CRI > 37\%$) крупністю 0-5,0 мм і низькореакційного ($CRI < 37\%$) крупністю 0-2,5 мм. Потім з кожного виду палива виділяли фракції 0-1,0 мм і їх змішували. Це дрібне паливо заочувалося всередину грудок шихти і служило внутрішнім джерелом теплоти при її спіканні. Введення у вихідну шихту виділеної пилюватої фракції крупністю (0-1 мм) з використанням палива, замість палива крупністю 0-3 мм, виключало її потрапляння в нижню частину шару, винесення з шару газовим потоком і збільшення швидкості вигорання всередині грудок шихти.

Для змішування шихти використовували лабораторний шнековий змішувач (рис. 1), огрудкування аглошихти відбувалось в лабораторному барабанному огрудкувачі (рис. 2), а спікання проводили паралельно в чотирьох аглоцашах діаметром 100 мм і висотою шару, що спікається 300 мм (рис. 3).



Рис. 1 – Шнековий змішувач



Рис. 2 – Барабанный огрудкувач

У процесі укладання цієї шихти у верхню половину шару, що спікається, вводили додатково вуглець у вигляді твердого палива з високою реакційною здатністю ($CRI > 37\%$) крупністю 1-5,0 мм, в якому вміст фракції 2-5 мм становив 75-95%.



Рис. 3 – Лабораторна агломераційна установка

Збільшення крупності високореакційного палива дозволило, не знижуючи часу його вигорання, збільшити локальне виділення теплоти та підвищення температури у цій частині шару. У нижню половину шару, що спікається, вводили вуглець у вигляді твердого палива з низькою реакційною здатністю ($CRI < 37\%$) крупністю 1,0-2,5 мм.

Питома витрата вуглецю, введенного паливом з різною реакційною здатністю і крупністю у вихідну шихту, у верхню і нижню половини шару, відповідала сумарному розрахунковому значенню питомого вмісту вуглецю в шарі, що спікається, що забезпечувало при згорянні виділення необхідної кількості теплоти.

Введення високореакційного більш крупного (1,0-5,0 мм) палива у верхню половину шару дозволило отримати необхідну температуру і необхідну кількість теплоти за рахунок локалізації вогнищ горіння між грудками шихти. В результаті, здійснювалося якісне спікання шихти в цій частині шару до моменту різкого охолодження отриманого агломерату холодним повітрям, що просмоктується.

За рахунок більшого часу перебування нижньої половини шару в зоні максимальних температур, використання теплоти, рекуперованої теплоносієм у верхній частині шару, та знаходження в цій частині шару відносно дрібного (1,0-2,5 мм) низькореакційного палива, забезпечується підтримка необхідних температур для якісного спікання агломерату. Крім того, відсутність некатаного в шихту пилювато (0-1,0 мм) палива також виключає його втрати та сприяє повному вигоранню решти палива та максимальному виділенню теплоти.

Результати випробувань (див. таблицю) показують, що оптимальні показники відповідають дослідом 2 і 3 з рекомендованим місцем введення і крупністю твердого палива в шихту, а також у верхній і нижній половинах шару шихти, котрі містять тверде паливо з високою ($CRI > 37\%$) і низькою ($CRI < 37\%$) реакційною здатністю.

Таблиця

Вплив гранулометричного складу та реакційної здатності палива в шарах аглошихти на показники спікання та характеристики одержуваного агломерату

Періоди випробувань	Питома продуктивність, т/м ² ·год	Загальна питома витрата вуглецю, кг/т агломерату	Крупність палива в шихті, мм	Кількість вуглецю в шихті, %	Крупність палива, що вводиться в шари, мм	Кількість введенного у верхній шар палива фракції 2-5 мм, %	Вміст залишкового вуглецю в агломераті, %
Базовий:	1,15	52,3	0 – 3,0	4,36	0 – 3,0	100,0	1,8
верх шару			0 – 3,0		0 – 3,0	100,0	3,1
низ шару			0 – 3,0		0 – 3,0	100,0	0,5
Дослідний 1:	1,34	52,4	0 – 1,0	4,37			0,4
верх шару*			0 – 1,0		1,0 – 5,0	71,3	0,5
низ шару			0 – 1,0		1,0 – 2,5	100,0	0,3
Дослідний 2:	1,46	51,3	0 – 1,0	4,27			0,1
верх шару			0 – 1,0		1,0 – 5,0	75,9	0,1
низ шару			0 – 1,0		1,0 – 2,5	100,0	0
Дослідний 3:	1,48	50,8	0 – 1,0	4,23			0,1
верх шару			0 – 1,0		1,0 – 5,0	96,1	0
низ шару			0 – 1,0		1,0 – 2,5	100,0	0,1
Дослідний 4:	1,37	52,9	0 – 1,0	4,41			0,6
верх шару			0 – 1,0		1,0 – 5,0	98,2	0,8
низ шару			0 – 1,0		1,0 – 2,5	100,0	0,2

Продовження таблиці

Періоди випробувань	Вміст залишкового вуглецю в агломераті, %	Вміст дріб'язку 0-5 мм в агломераті, %	Барабанне випробування, %		Вміст в агломераті, %		
			міцність на удар (+5 мм)	стиранність (0-0,5 мм)	Fe _{заг}	FeO	основність, д.од.
Базовий:	1,8	8,3	63,4	7,1	53,6	11,7	1,28
верх шару	3,1						
низ шару	0,5						
Дослідний 1:	0,4	8,1	63,5	7,3	53,4	11,5	1,29
верх шару*	0,5						
низ шару	0,3						
Дослідний 2:	0,1	7,3	65,6	6,4	53,8	11,9	1,27
верх шару	0,1						
низ шару	0						
Дослідний 3:	0,1	6,4	66,1	5,7	53,9	11,3	1,25
верх шару	0						
низ шару	0,1						
Дослідний 4:	0,6	7,8	62,9	6,9	53,3	11,4	1,26
верх шару	0,8						
низ шару	0,2						

* верх шару – високореакційне паливо (CRI > 37%), низ шару – низькореакційне паливо (CRI < 37%)

Реалізація розробленої технології може бути здійснена в діючих цехах без складної реконструкції та з мінімальними капіталовкладеннями. Технологічний режим буде здійснюватись наступним чином. Спочатку буде виконуватись підготовка необхідні фракції двох видів твердого палива: високореакційного ($CRI > 37\%$) крупністю 0-5,0 мм і низькореакційного ($CRI < 37\%$) крупністю 0-2,5 мм. Потім з кожного виду палива шляхом просіювання відокремлюються фракції 0-1,0 мм, які потім змішуються. У відділенні дозування згідно з виконаним розрахунком дозуються залізисті (аглолуда, концентрат, колошниковий пил, металургійні шлами, прокатна окалина та ін.) матеріали, флюси і усе відсієне пилувате паливо у кількості 5-45% від розрахункової кількості загальної питомої витрати вуглецю, який вноситься твердим паливом. Аглошхита змішується, огрудовується та укладається на візки агломашини завантажувальним пристроєм і укладальником. Над укладальником шихти на палети агломашини встановлюються два бункери. У перший по ходу агломашини бункер завантажувється низькореакційне паливо крупністю 1,0-2,5 мм, з якого воно дозується на укладальник і подається в огрудовану шихту в кількості, що забезпечує отримання цим шаром необхідної кількості теплоти. У другий по ходу агломашини бункер завантажувється високореакційне паливо крупністю 1,0-5,0 мм, в якому повинно міститися 75-95% фракції 2,0-5,0 мм. З цього бункера паливо дозується на укладальник і подається в отриману окомковану шихту в кількості, що також забезпечує отримання цим шаром необхідної кількості теплоти. Спінання шару аглошхити на агломашині і обробка готового агломерату здійснюються за прийнятою технологією без жодних змін.

Висновки

1. Виконаний літературний огляд показав недоліки сучасної технології агломерації, що застосовується на українських металургійних підприємствах. Показано, що верхньому шару не вистачає до 50% необхідної теплоти, в той же час нижній отримує до 70% надлишкової теплоти. Відмічені технологічні рішення, які дозволяють вирішити дану проблему шляхом оптимізації параметрів спікання. Тим не менше, не всі можливості в цьому напрямку досліджені, а додаткова технологічна варіативність стане корисною для українських агломераційних фабрик, що знаходяться в пошуку оптимальних технологічних умов.

2. Розроблена технологія спікання, яка передбачає введення твердого палива з будь-якою реакційною здатністю крупністю 0-1,0 мм в кількості 5-45%, а в процесі укладання огрудованої шихти на візки для спікання в неї додатково вводять у верхній і нижній шари шихти тверде паливо з різною реакційною здатністю, розподіляючи його між гранулами шихти, причому спочатку укладають нижню половину шару шихти, в яку вводять тверде паливо з низькою реакційною здатністю ($CRI < 37\%$) крупністю 1,0-2,5 мм, а потім

укладають верхню половину спікаючого шару окомкованої шихти, в яку вводять тверде паливо з високою реакційною здатністю ($CRI > 37\%$) крупністю 1,0-5,0 мм, в якому кількість фракції 2,0-5,0 мм повинна бути 85-95%, причому сумарна питома витрата вуглецю, введенного паливом з різною реакційною здатністю та крупністю в різні ділянки шару відповідає сумарному розрахунковому значенню, що забезпечує при його згорянні виділення необхідної кількості теплоти і максимальну температуру в спікаючому шарі.

3. Розроблена технологія дозволила підвищити питому продуктивність аглочаши з 1,15 до 1,46-1,48 т/м²·год, знизити питому витрату вуглецю твердого палива з 52,3 до 50,8-51,3 кг/т, покращити характеристики міцності агломерату, знизити вміст дріб'язку в агломераті з 8,3 до 6,4-7,3%, зменшити вміст залишкового вуглецю до 0,05%, а також підвищити вміст заліза до 53,8-53,9%.

4. Описана схема реалізації розробленої технології спікання агломерату, яка не передбачає суттєвої реконструкції в діючих аглоцехах та може бути реалізована з мінімальними капіталовкладеннями.

Перелік використаних джерел

- [1] Сигов В.А., Шурхал В.А. Агломерационный процесс. К. : Техника, 1969. 232 с.
- [2] Хлапонин Н.С., Кривошеев В.Н., Андронов В.В. О двухслойном спекании аглошхиты. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1967. № 4. С. 8-10.
- [3] Pahlevaninezhad M., Emanmi M.D., Panjepour M. The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed. *Energy*. 2014. Vol. 73. Pp. 160-176. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.003>.
- [4] Ramos M.V., Kasai E. Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed. *The Journal of the Iron and Steel Institute of Japan International*. 2000, Vol. 40. № 5. Pp. 448-454. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.40.448>.
- [5] Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process / X.X. Huang et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 46. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1440160>.
- [6] Lovel R.R., Vining K.R., Dell'amico M. The Influence of Fuel Reactivity on Iron Ore Sintering. *The Journal of the Iron and Steel Institute of Japan International*. 2009. Vol. 49, no. 2. Pp. 195-202. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.195>.
- [7] Guan X., Liu S. Particle swarm algorithm based on simulated annealing to solve constrained optimization. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*. 2007. Vol. 37. Pp. 136-140.

- [8] Fuel appropriate distribution in iron ore sintering / Z. Huang et al. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2006. Vol. 37. Pp. 884-890.
- [9] Hou P., Choi S., Choi E. Improved distribution of fuel particles in iron ore sintering process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2011. Vol. 38. Pp. 379-385. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1743281211Y.0000000017>.
- [10] An intelligent integrated optimization system for the proportioning of iron ore in a sintering process / M. Wu et al. *Journal of Process Control*. 2014. Vol. 24. Pp. 182-202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.11.012>.
- [11] Спосіб агломерації залізовмісних матеріалів: пат. 78006 Україна: С22В 1/16. № 201208002; заявл. 27.06.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. 4 с.
- [12] Спосіб агломерації залізовмісних матеріалів: пат. 78007 Україна: С22В 1/16. № 201208003; заявл. 27.06.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. 4 с.
- [13] Спосіб агломерації залізовмісних матеріалів: пат. 78893 Україна: С22В 1/16. № 201208734; заявл. 16.07.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. 3 с.

RESEARCH OF THE AGGLOMERATION PROCESS WHILE PROVIDING AN INTERNAL HEAT SOURCE AND OPTIMIZATION OF THE THERMAL PATTERN ALONG THE HEIGHT OF THE LAYER

Chuprynov Ye.V.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: itchupa@gmail.com ;
Kassim D.O.	D.Sc. (Engineering), professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Liakhova I.A.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7589-8351 , e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua ;
Zaitsev G.L.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7909-9044 , e-mail: zaitsev@duet.edu.ua ;
Rekov Yu.V.	PhD (Engineering), associate professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0318-0168 , e-mail: yuriy.rekov@mipolytech.education

An analysis of domestic and foreign studies has been performed, which confirm the heterogeneity of heat distribution in the sintering charge layer. There is a differentiation of thermal impact on the upper and lower horizons of the layer, which is due to the uneven combustion of solid fuel. An assessment of the authors' previous studies has been carried out, and it has been concluded that the potential for further research in this direction remains significant. The expansion of technological variability can contribute to the development of optimal technological regimes for Ukrainian sintering plants that seek to increase production efficiency. The influence of the size and reactivity of solid fuel on the process of sintering of iron ore charge was investigated. The experiments were conducted in laboratory conditions using sintering bowls with a diameter of 100 mm and a layer height of 300 mm. The method involved separate fuel injection into the upper and lower layers of the charge in order to optimize the thermal regime. Two types of fuel were used: highly reactive (coke fines, CRI > 37%) and low-reactive (anthracite, CRI < 37%). For the upper layer, highly reactive fuel with a size of 1-5 mm was used, and for the lower layer, low-reactive fuel with a size of 1-2.5 mm. Additionally, a dusty fraction (0-1 mm) was introduced into the charge to provide an internal heat source. The results showed that optimal performance is achieved when using highly reactive fuel in the upper layer and low-reactive fuel in the lower layer. This allowed to increase the productivity of the sintering bowl from 1.15 to 1.46-1.48 t/m²·h, reduce carbon consumption from 52.3 to 50.8-51.3 kg/t, improve the strength of the sinter, reduce the content of fines and residual carbon, and also increase the iron content. The developed technology allows to effectively regulate the thermal regime in the charge layer, ensuring high-quality sintering and improving the characteristics of the sinter.

Keywords: agglomerate, solid fuel, reactivity, specific productivity, strength.

References

- [1] V.A. Sigov, and V.A. Shurkhal, *Aglomeracionnyj process* [Sintering process]. Kyiv, Ukraine: Technology Publ., 1969. (Rus.)
- [2] N.S. Khlaponin, V.N. Krivosheev, and V.V. Andronov, «O dvuhslojnom spekanii agloshihty» [«About two-layer sintering of sinter charge»], *Metallurhicheskaia y hornorudnaia promishlennost – Metallurgical and mining industry*, 1967, no. 4, pp. 8-10, 1967. (Rus.)
- [3] M. Pahlevaninezhad, M.D. Emanmi, and M. Panjepour, «The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed», *Energy*, vol. 73, pp. 160-176, 2014. doi: **10.1016/j.energy.2014.06.003**.
- [4] M.V. Ramos, and E. Kasai, «Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sinter-ing Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed», *The Journal of the Iron and Steel Institute of Japan International*, vol. 40, №5, pp. 448-454, 2000. doi: **10.2355/isijinternational.40.448**.
- [5] X.X. Huang, X.H. Fan, X.L. Chen, X.Z. Zhao, and M. Gan, «Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process», *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 46, pp. 1-7, 2018. doi: **10.1080/03019233.2018.1440160**.
- [6] R.R. Lovel, K.R. Vining, and M. Dell'amico, «The Influence of Fuel Reactivity on Iron Ore Sintering», *The Iron and Steel Institute of Japan International*, vol. 49, no. 2, pp. 195–202, 2009. URL: doi: **10.2355/isijinternational.49.195**.
- [7] X. Guan, and S. Liu, «Particle swarm algorithm based on simulated annealing to solve constrained optimization», *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, vol. 37, pp. 136-140, 2007.
- [8] Z. Huang, Y. Jiang, X. Mao, B. Xu, Y. Guo, and T. Jiang, «Fuel appropriate distribution in iron ore sintering», *Journal of Central South University (Science and Technology)*, vol. 37, pp. 884-890, 2006.
- [9] P. Hou, S. Choi, and E. Choi, «Improved distribution of fuel particles in iron ore sintering process», *Iron-making & Steelmaking*, vol. 38, pp. 379-385, 2011. doi: **10.1179/1743281211Y.0000000017**.
- [10] M. Wu, X. Chen, W. Cao, J. She, and C. Wang, «An intelligent integrated optimization system for the proportioning of iron ore in a sintering process», *Journal of Process Control*, vol. 24, pp. 182-202, 2014. doi: **10.1016/j.jprocont.2013.11.012**.
- [11] F.M. Zhuravlev et al., «Sposib ahlomeratsii zalizovmisnykh materialiv» [«Method of agglomeration of iron-containing materials»], *UA Patent Appl.* 201208002, Nov. 03, 2013.
- [12] F.M. Zhuravlev et al., «Sposib ahlomeratsii zalizovmisnykh materialiv» [«Method of agglomeration of iron-containing materials»], *UA Patent Appl.* 201208003, Nov. 03, 2013.
- [13] F.M. Zhuravlev et al., «Sposib ahlomeratsii zalizovmisnykh materialiv» [«Method of agglomeration of iron-containing materials»], *UA Patent Appl.* 201208734, Oct. 04, 2013.

Стаття надійшла 26.02.2025

Стаття прийнята 14.03.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Дослідження процесу агломерації при забезпеченні внутрішнього джерела теплоти та оптимізації теплової картини по висоті шару / Є.В. Чупринов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 111–116. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336311>.

ДОМЕННА ПЛАВКА ПІД ТИСКОМ І ЗБАГАЧЕННЯ ДУТТЯ КИСНЕМ –
ІНТЕНСИФІКАТОРИ ПРОЦЕСУ ЧИ НЕОБҐРУНТОВАНА ДАНИНА ТРАДИЦІЯМ

Крячко Г.Ю.

канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет,
м. Кам'янське, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>, e-mail:
наука_m4m@ukr.net;

Сігарьов Є.М.

д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет,
м. Кам'янське, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>, e-mail: en_sigarev@ua.fm

Показана помилковість існуючих тверджень про необґрунтовану доцільність використання підвищеного тиску газу в робочому просторі доменних печей і збагачення дуття киснем в якості інтенсифікаторів доменного процесу, обумовлена некоректним співставленням роботи печей різного об'єму, що працювали у різко відмінних силових та експлуатаційних умовах. На прикладі двох доменних печей одного підприємства, об'єм яких відрізнявся майже у два рази, показано, що зі збільшенням корисного об'єму печі значення підвищеного тиску газу, як засобу інтенсифікації плавки, зростає в порівнянні з агрегатами меншої потужності. Наведено основні причини зростання опору стовпа шихти, пов'язані як зі зменшенням об'ємної частки коксу в «сухій» зоні печі, так і потонінні коксових «вікон» в зоні когезії при зменшенні об'ємної частки коксу, завищенням робочої висоти доменних печей радянських проєктів та необхідністю утворення потужних фурменних вогнищ для перерозподілу фурменного газу до центру печі при зростанні потужності агрегатів. Саме для подолання дії негативних факторів з метою інтенсифікації плавки дуттям повсюдно використовується доменна плавка під тиском. Отримані за результатами досліджень дані не тільки свідчать про дієвість застосування підвищеного тиску газу, але й вказують на диференційований його вплив на інтенсивність плавки в печах різного об'єму. Згідно з результатами дослідження без залучення підвищення тиску газу на колошнику, як інтенсифікатора доменної плавки, форсування ходу печі дуттям може бути здійснено лише за рахунок збільшення нерівномірності радіального газорозподілу з перевитратою коксу. Показано, що підвищення тиску газу в робочому просторі печей і збагачення дуття киснем не є антагоністами, оскільки спрямовані на подолання негативних змін різної природи, що виникали в процесі удосконалення доменної плавки.

Ключові слова: доменна піч, інтенсифікатори, тиск газу, опір, збагачення, кисень, дуття, форсування.

Постановка проблеми

З появою відомих монографій М.І. Красавцева (1958 р.), В.М. Щедрина (1962 р.) і О.Н. Рамма (1980 р.), узагальнюючих досвід впровадження доменної плавки під тиском, склалися певні засади для використання підвищеного тиску газів (ПТГ) в якості інтенсифікатора доменного процесу. Проблема виникла тому, що на зламі століть [1] в технічній літературі і надалі [2, 3] з'явилися публікації, які ставлять під сумнів доцільність використання ПТГ і подальше впровадження технології збагачення дуття киснем (ЗДК), які не виправдали очікувань [3] і навіть являють собою міфи минулих років [2]. Оскільки останні публікації впливають на сучасну технологічну політику організації доменного процесу слід розглянути аргументацію авторів [1-3] стосовно досліджуваного питання. Прикладом становища, що склалося, є поява навчального посібника, в якому ПТГ не розглядається в якості інтенсифікатора плавки [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Перше критичне зауваження на адресу доцільності використання підвищеного тиску в робочому просторі печі обґрунтовується тим, що в попередні роки, коли печі працювали на нормальному (звичай надмірному до 20 кПа) тиску газу на колошнику і без збагачення дуття киснем, інтенсивність горіння коксу була

значно вище, ніж на сучасних печах (Е.Г. Донсков зі співавторами, 2013). В якості аргументу наводиться порівняння роботи печей з видань М.О. Павлова 1949 р. видання та І.З. Козловича 1951 р. [3] з роботою печей кінця ХХ і початку ХХІ століття. Нажаль зміни, що відбулися в структурі стовпа шихти в процесі удосконалення підготовки плавильних матеріалів і зростання потужності доменних печей, а також впровадження прогресивних технологій плавки, які визначають організацію газодуттєвого режиму та інтенсивність плавки, авторами [1-4] були проігноровані.

Друге критичне зауваження стосується впливу ПТГ на роботу доменного компресора. Е.Г. Донсковим зі співавторами (2013 р.) та у роботі [2] стверджується, що доменна плавка під тиском ускладнює роботу компресора і вимагає збільшення його потужності. Багаторічний досвід показав, що позитивні зміни у веденні доменного процесу під тиском переважають перевитрати енергії на стиснення дуття, тому вказане вище зауваження можна вважати безпідставним. Між тим слід визнати факт недостатньої потужності вітчизняних повітродувок, що гальмує встановлення бажаного газодуттєвого режиму (Г.Ю. Крячко, 2002).

В якості аргументу на користь недоцільності використання ПТГ автори наводять матеріали публікації Є.Г. Тетерев'ятникова і В.Н. Андронova (1957 р.), де перелічуються недоліки в організації доменної плавки під тиском в перше десятиліття впровадження ПТГ. Це

стосувалося зниження стійкості футерівки шахт, засипних пристроїв, атмосферних клапанів, тощо. Зрозуміло, що перехід на ПТГ був неможливим без суттєвих конструктивних змін доменних печей і допоміжного обладнання, які надалі були впроваджені.

Піддано критиці також сумісне використання підвищеного тиску газу і збагачення дуття киснем, оскільки, як вважають Е.Г. Донсков зі співавторами (2013 р.), вони є антагоністами, посилюючи негативний вплив на газорозподіл в горні, зменшуючи розміри зон горіння.

В якості альтернативи застосуванню ПТГ і ЗДК пропонується збільшення сумарного перетину повітряних фурм, як засобу збільшення подавання в піч атмосферного кисню. Намагання технологів тривалий час зменшувати діаметр фурм Е.Г. Донсков зі співавторами (2013 р.) вважають шкідливим явищем. На захист власних міркувань наводяться приклади з практики, зокрема досвіду «Азовсталі» 60-х років ХХ ст. в сировинних та експлуатаційних умовах, далеких від сучасних.

Мета статті

Показ помилковості існуючих тверджень про необґрунтовану доцільність використання підвищеного тиску газу в робочому просторі доменних печей і збагачення дуття киснем в якості інтенсифікаторів доменного процесу.

Виклад основного матеріалу

Будь-яке покращення сировинних або експлуатаційних умов доменної плавки завжди призводить до певної економії коксу, яка супроводжується зміною об'єму останнього в стовпі шихти. Для орієнтовної

оцінки цієї зміни провели вибірку практичних даних про роботу різних печей в різних умовах за період з 1955 по 2010 рр. включно, таким чином, щоб діапазон зміни питомої витрати коксу був якомога великим. Об'ємну частку коксу в зоні кускових матеріалів, що окреслюється поверхнею засипу вгорі і верхньою межею зони когезії, розраховували за даними витратних коефіцієнтів всіх матеріалів на 1 т чавуну. Насипну масу матеріалів прийняли наступною: кокс, агломерат, руда залізна, обкотиші, вапняк 0,5; 1,7; 2,4; 2,1; 1,5 т/м³ відповідно.

Результати розрахунку, представлені на рис. 1, а, свідчать про те, що в конкретному прикладі зменшення питомої витрати коксу з 1068 до 293 кг/т чавуну знизило об'ємну частку коксу в шахті доменної печі з 57,7 до 45,6%. Оскільки газопроникність шару коксу в рази більша, ніж залізородних матеріалів, особливо агломерату, то зменшення об'ємної частки коксу в «сухій» зоні печі неминуче призведе до погіршення її газопроникності.

Друга причина негативного впливу на формування стовпа шихти при зменшенні об'ємної частки коксу в ньому полягає у потоншанні коксових «вікон» в зоні когезії і, відповідно, в підвищенні опору останньої.

Третя причина зростання опору стовпа шихти навіть при однакових умовах плавки є актуальною для доменних печей радянських проєктів, в яких суттєво завищена робоча висота, від рівня повітряних фурм до поверхні засипу. Якщо прийняти відносну величину опору шару доменної шихти висотою 1 м ($\Delta P/1$ м) в розмірі 5 кПа, то тільки за рахунок зростання робочої висоти печей втрати напору пічного газу будуть наступними:

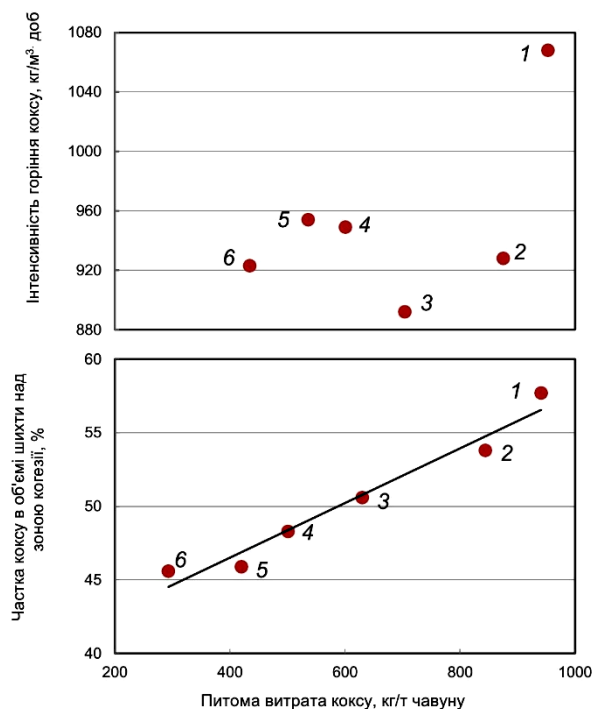
Об'єм печі, м ³	1033	1386	1513	1719	2000	2300	2700	3000	3200	5000	5500
h_p , м	21,5	22,7	24,0	24,3	24,4	25,4	25,8	26,8	26,8	27,6	27,6
$\Delta P_{\text{заг}}$, кПа	108	114	120	122	122	127	129	134	134	138	138
Різниця в порівнянні з ДП 1033 м ³ , кПа		6	12	14	14	19	21	26	26	30	30

Четверта причина зростання опору стосується фурменної зони доменних печей. Впровадження агрегатів більшої потужності пов'язане з неминучим збільшенням опору на повітряних фурмах [5], обумовленим необхідністю утворення потужних фурменних вогнищ для перерозподілу фурменного газу до центру печі.

Саме для подолання дії негативних факторів з метою інтенсифікації плавки дуттям повсюдно використовується доменна плавка під тиском.

Зміна інтенсивності горіння коксу на печах в процесі удосконалення технології виробництва чавуну

показана на рис. 1, б, звідки видно зниження показника інтенсивності в порівнянні з роботою малої печі на нормальному тиску газу без збагачення дуття киснем (поз. 1 на рис. 1, б). Найнижчі показники інтенсивності стосуються колишніх ждановських печей заводу ім. Ілліча та «Азовсталі» (поз. 2 і 3 на рис. 1, б відповідно). Показник інтенсивності печі ЖМЗ відповідає четвертому місяцю після задування печі, а печі «Азовсталі» – роботі печі на бідному залізом камишбурунському агломераті з підвищеним виходом шлаку.



№	V_k, m^3	Підприємство	Рік
1	675	ДнМЗ	1955
2	1719	ЖМЗ	1959
3	1719	АзСт	1963
4	2700	КрСт	1975
5	5500	ССт	2003
6	4400	Таранто, Італія	2010

Рис. 1 – Залежність частки коксу в об'ємі шихтових матеріалів над зоною когезії (а) та інтенсивності горіння коксу (б) від питомої витрати коксу при виплавці переробного чавуну в різних сировинних та експлуатаційних умовах: ДнМЗ – Дніпропетровський металургійний завод; ЖМЗ – Ждановський МЗ; АзСт і КрСт – МК «Азовсталь» і «Криворіжсталь» відповідно; ССт – «Северсталь», рф; V_k – корисний об'єм печі; 4* - 6* - інтенсивність з урахуванням горіння додаткового палива

Оскільки печі, позначені індексами 2-6, працювали з ПТГ і ЗДК з вдуванням заміників коксу, користуватися індексом інтенсивності згорання коксу буде недоречно. Для більш ґрунтовної оцінки впливу ПТГ на інтенсивність плавки використали дані дослідження впливу витрати дуття на хід плавки ДП №9 «Криворіжсталі», проведені Інститутом чорної металургії (м. Дніпро) (І.Г. Ризницький зі співавторами, 1988 р.). За даними цього дослідження розраховували витрати загального кисню в дутті (атмосферне дуття + технологічний кисень на його збагачення), а також природного газу в одиницю часу, співвідношення кисню і природного газу між собою і по відношенню до витрати дуття, інтенсивності роботи печі за паливом і дуттям.

Інтенсивність горіння палива розрахована за виразом $\Pi \cdot (k + \Pi') / V_k$, де Π – продуктивність печі, т/доб; k – питома витрата коксу, т/т чавуну; Π' – витрата природного газу в перерахунку на кокс, що був замінений газом: $\Pi' = \Pi \cdot k_3$, де Π – витрата газу, м³/т чавуну; k_3 – коефіцієнт заміни коксу згідно довідника в залежності від витрати газу 0,7-0,8 кг/м³; V_k – корисний об'єм печі, м³.

Дані, представлені в табл. 1, свідчать про те, що встановити більш форсований газодуттєвий режим у

другому періоді вдалося за рахунок підвищення тиску газу на колошнику зі 181 до 198 кПа і ступені стиснення дуття з 3,59 до 3,67. Завдяки цьому було збільшено витрату дуття на 407 м³/хв і його температуру на 49°C без порушень рівного ходу доменної печі.

В результаті інтенсивність плавки зросла за всіма показниками, причому за паливом до величин, співставними з печами меншого об'єму. За інформацією дослідників, хід печі в III-му періоді відрізнявся нестабільністю, яка виражалася зростанням і коливанням температури периферійного газу, обривами шихти і неможливістю управління режимом завантаження і оточуваним газорозподілом. Причина погіршення роботи печі в цьому періоді полягає в наступному. Збільшення витрати дуття без підвищення тиску газу на колошнику стало можливим за рахунок збільшення нерівномірності газорозподілу, а саме за рахунок розкриття периферії. Розкриттю периферії сприяло падіння ступеня стиснення дуття в порівнянні з базовим (3,55 проти 3,59) і другим періодами (3,55 проти 3,67). Наслідком посилення периферійного ходу стало суттєве зниження рудного навантаження 3,72 проти 3,86 в базовому періоді і проти 3,90 у другому.

Таблиця 1

Показники роботи доменної печі №9 МК «Криворіжсталь» під час випробувань різних газодуттьових режимів, розраховані за даними І.Г. Ризницького зі співавторами (1988 р.)

Показник	Періоди		
	I	II	III
Тривалість періодів, діб	31	53	23
Продуктивність, т/доб	9499	9820	9837
Витрата коксу, кг/т чавуну	470	463	471
Дуття:			
загальна витрата, м ³ /хв	7548	7955	8202
витрата кисню, м ³ /хв	2385	2426	2321
температура, °С	1128	1177	1177
вміст кисню, %	31,6	30,5	28,3
надмірний тиск, кПа	352	387	386
ступінь стиснення дуття $\epsilon \cdot 10^2$	3,59	3,67	3,55
Природний газ:			
витрата:			
м ³ /хв	844	859	902
% до дуття	11,2	10,8	11,0
% до кисню дуття	0,35	0,35	0,39
Надмірний тиск газу на колошнику, кПа	171	189	190
Перепад тисків – дуття – колошник, кПа	181	198	196
Інтенсивність роботи, т/м ³ ·доб:			
за коксом	0,884	0,909	0,934
за паливом	1,064	1,082	1,108
за рудною шихтою	3,449	3,548	3,450
Інтенсивність роботи за дуттям, м ³ /м ³ ·хв	1,510	1,591	1,640
Рудне навантаження	3,86	3,90	3,72
Вміст кремнію в чавуні, %	0,87	0,76	0,77
Простої, %	0,98	1,40	0,77
Робота на збавленому дутті, %	0,07	0,05	0,05
Кількість горілих фурм:			
всього	23	38	24
за добу	0,7	0,7	1,04

Незважаючи на збільшення часової витрати природного газу в порівнянні з базовим і другими періодами на 58 і 43 м³/хв відповідно витрата коксу в III-му періоді не знизилася, а в порівнянні з другим періодом зросла на 8 кг/т чавуну. Сюди слід додати і те, що в порівнянні з базовим періодом температура дуття в III-му періоді була на 49°С вище, а це як мінімум 1% економії коксу, яка не відбулась.

Таким чином, результати дослідження, наведені вище, показали, що без залучення підвищення тиску газу на колошнику, як інтенсифікатора доменної плавки, форсування ходу печі дуттям може бути здійснено лише за рахунок збільшення нерівномірності радіального газорозподілу з перевитратою коксу.

Слід надати належне науковій об'єктивності і доброчесності автора згаданого вище посібника [4] В.П. Лялюка, який вважав, що «... підвищення тиску газу на колошнику шляхом введення додаткового штучного опору в газовій мережі печі, з фізичної сутності впливу на динаміку дуття-газу еквівалентно впливу погіршення фізичних показників (міцності) залізорудної сировини і палива, тобто зниженню

газопроникності стовпа шихтових матеріалів у доменній печі» (с. 225 посібника [4]). І разом із тим він представив переконливі дані впливу тиску колошникового газу на інтенсивність ходу потужних печей ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (рис. 2), які спростовують тезу автора, наведену в цитаті. Однак на відміну від авторської інтерпретації даних [4], залежності двох печей представлені в об'єднаному форматі, звідки видно, що при однаковому тиску газу на колошнику інтенсивність плавки на меншій печі вище ніж на більшій (рис. 2, б).

Тобто показані на рис. 2 дані не тільки свідчать про дієвість застосування ПТГ, але й вказують на диференційований його вплив на інтенсивність плавки в печах різного об'єму. Зі збільшенням корисного об'єму доменної печі в підтриманні високого рівня інтенсивності плавки значення підвищення тиску газу на колошнику, як інтенсифікатора процесу, зростає у зв'язку з необхідною компенсацією дії факторів, пов'язаних з конструкційними недоліками потужних печей і змінами структури стовпа шихти, обумовленими як покращенням умов плавки, так і специфікою

радіального газорозподілу. Навпаки зі зменшенням корисного об'єму печі для отримання позитивного ефекту в зростанні інтенсивності плавки достатнє менше за абсолютною величиною підвищення тиску газу в її робочому просторі.

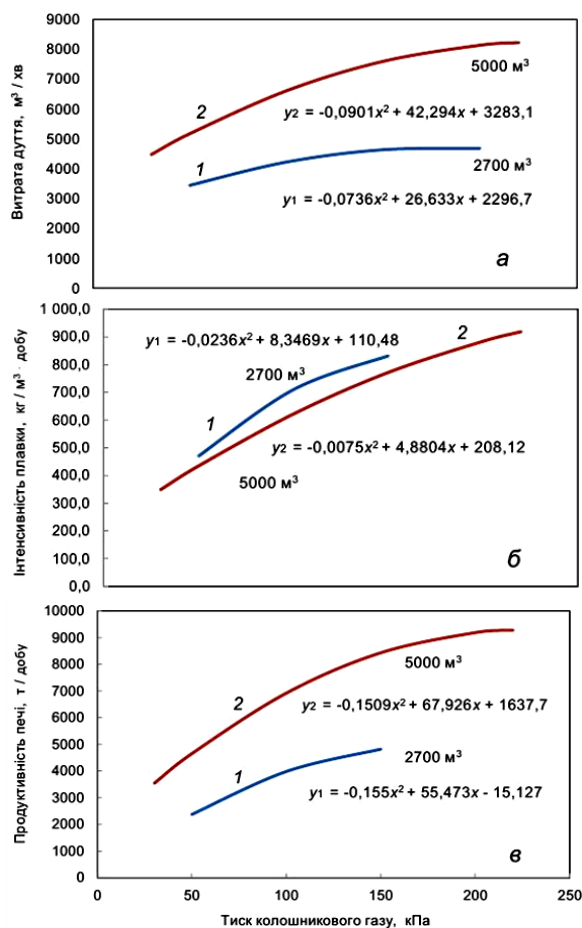


Рис. 2 – Залежності витрати дуття (а), інтенсивності плавки за спаленим коксом (б) і продуктивності печей об'ємом 2700 м³ (1) і 5000 м³ (2) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» від тиску газу на колошнику за даними В.П. Лялюка [4]

Переконливим прикладом вирівнювання ходу доменної печі під впливом підвищеного тиску газу є інформація про тиск газу на колошнику (рис. 3, а, б) і рівень засипу шихти (рис. 3, в, г). Паперові діаграми з автоматичним записом параметрів, якими користувалися в минулому, свідчать про стабілізацію коливань тиску газу на колошнику і поверхні засипу.

Амплітуда коливань тиску газу на колошнику печі, що працювала при нормальному надмірному тиску (зазвичай < 20 кПа), була суттєвою і характеризувалась так званими газовими поштовхами, що відповідали завантаженню чергових порцій шихти в піч і піками тиску униз при утворенні невеликих каналів на поверхні засипу. Поверхня засипу за нормального тиску газу на колошнику також була нестійкою – в місцях утворення каналів відбувалося «пірнання»

ланцюгових зондів (рис. 3, в), що спотворювало інформацію про рівень засипу. При підвищеному тиску подібне явище не спостерігалось (рис. 3, г).

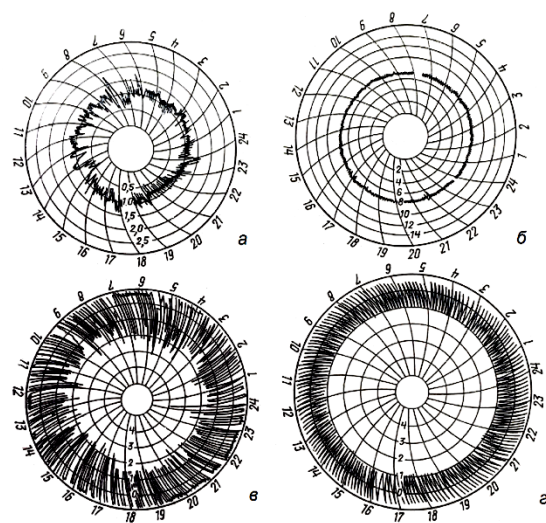


Рис. 3 – Діаграми тиску газу на колошнику і рівня засипу шихти до (а, б) і після (в, г) переведення доменної печі НЛМЗ на підвищений надмірний тиск (80 кПа) за О.Н. Раммом: ціна ділення на діаграмі (б) 10 кПа

Підвищення тиску газу в робочому просторі печі і збагачення дуття киснем не можуть бути антагоністами, оскільки спрямовані на подолання негативних змін різної природи, що виникали в процесі удосконалення доменної плавки. Перший інтенсифікатор (ПТГ) виник, як протидія впливу факторів, що зменшували газопроникність стовпа шихти в цьому процесі. Другий інтенсифікатор (ЗДК) при виплавці переробного чавуну став необхідною складовою комбінованого дуття, перш за все для покращення газифікації додаткового палива у фурменному вогнищі.

Поєднання вдування природного газу зі збагаченням дуття киснем відкрило у свій час (1958-1991 рр.) широкі перспективи, як для використання природного газу, так і для застосування кисню в доменному виробництві. Оскільки природний газ і кисень впливають на більшу частину суттєво важливих параметрів доменного процесу в прямо протилежних напрямках, то їх сумісне застосування дозволяло навіть при дуже високих витратах того чи іншого підтримувати доменний процес в прийнятних до нормальної роботи межах. Практика показує, що і при повсюдному переході на вдування пиловугільного палива кисень не втратив значення в якості інтенсифікатора доменної плавки.

Щодо «шкідливості» тенденції зменшення діаметру повітряних фурм, висловленої в роботі Е.Г. Донскова зі співавторами (2013 р.). За даними відомого довідника (Ю.П. Волков та ін., 1986 р.) розраховували інтенсивність горіння коксу, що припадала на одну фурму в доменних цехах колишнього СРСР, що мали доменні печі різного об'єму (табл. 2).

Таблиця 2

Інтенсивність горіння коксу в розрахунку на одну повітряну фурму при роботі доменних печей в умовах планової економіки

Комбінат	Об'єм печі, м ³	Фурми		Інтенсивність горіння коксу I_k/n , кг/м ³ ·доб
		кількість n	діаметр, мм	
Криворіжсталь	2000	20	165	45,0
	2700	24	160	42,5
	5000	42	155	20,6*
Ждановський, надалі Маріупольський	2000	20	170	46,2
	2300	20	160	43,4
Карагандинський	1719	18	180	50,4
	3200	28	170	30,3
Череповецький	1033	16	160	72,0
	2000	20	150	52,9
	2700	24	145	41,5

* при роботі на всіх фурмах

Таблиця 3

Показники інтенсивності горіння коксу і газодуттєвого режиму роботи повітряних фурм доменних печей «Криворіжсталі» в умовах ринкової економіки, розраховані за даними [6]

№ печі	7	8	9
об'єм, м ³	2000	2700	5000
$(R_r - L_{фв}^{*1})$, мм	3380	4000	5850
Інтенсивність горіння коксу, кг/м ³ ·доб			
на піч	766	652	618
на фурму	38	27	15
Витрата дуття, м ³ /хв			
на піч	3200	3940	6328
на фурму	160	164	158* ²
Питома степінь стис- нення $\epsilon \cdot 10^2$	6,4	5,3	3,6
Надмірний тиск газу на колошнику, кПа	121	123	131
Перепад тисків кільцева труба - колошник	121	122	151

*¹ Довжину фурменного вогнища від торця фурми в напрямку центру горна прийнято 1,5 м*² Розрахунок на 40 працюючих фурм

Зменшення діаметру повітряних фурм при збільшенні корисного об'єму печей є обґрунтованим вимушеним заходом збереження активної роботи горна при збільшенні різниці між радіусом горна R_r і довжиною фурменного вогнища $L_{фв}$. Не зважаючи на зменшення діаметру фурм технологи намагаються зберегти витрату дуття крізь фурму, аби не втратити протяжність вогнища. Для прикладу використано дані про роботу печей «Криворіжсталі» в умовах ринкової економіки і низькій інтенсивності плавки за коксом [6].

Результати розрахунку представлені в табл. 3.

Незважаючи на підтримання витрати дуття на фурму приблизно в однакових межах на всіх печах інтенсивність горіння коксу, розрахована на одну фурму, знизилась від ДП №7 до ДП №9 більше ніж у два рази. Обумовлено це, перш за все, зниженням питомої степені стиснення дуття зі зростанням об'єму печей. Так показник $\epsilon \cdot 10^2$ знизився з 6,4 для ДП №7 до 3,6 для ДП №9. Тобто визначальним фактором інтенсифікації

горіння перед фурмами є питома степінь стиснення дуття, яка залежить від тиску газу на колошнику і перепаду тисків в стовпі шихти. Все це вказує на те, що якість атмосферного чи збагаченого киснем дуття за питомим стисненням залежна від потужності доменного компресору, але аж ніяк не від збільшення сумарного перетину повітряних фурм, про що стверджують Е.Г. Донсков зі співавторами (2013 р.).

Висновки

На практичних прикладах показана помилковість суджень про недоцільність використання підвищеного тиску газів і збагачення дуття киснем в якості інтенсифікаторів доменної плавки. Помилковість суджень обумовлена некоректним співставленням роботи печей різного об'єму, що працювали у різко відмінних сировинних та експлуатаційних умовах.

Розглянуто аргументи на користь застосування підвищеного тиску газу для подолання зростаючого опору стовпа шихти включно з опором фурменної зони, обумовлені зміною частки коксу в об'ємі шихти, змінами висоти печей і параметрів повітряних фурм.

На прикладі двох доменних печей одного підприємства, об'єм яких відрізнявся майже у два рази, показано, що зі збільшенням корисного об'єму печі значення підвищеного тиску газу як засобу підвищення інтенсивності плавки зростає в порівнянні з агрегатами меншої потужності.

Підвищення тиску газу в робочому просторі печей і збагачення дуття киснем не є антагоністами, оскільки виконують різні функції. Перший інтенсифікатор використовують, перш за все, як протидію неминучого зростання опору стовпа шихти в доменній печі в результаті збільшення її розмірів, а також тих чи інших удосконалень технології. Другий інтенсифікатор, а саме додатковий кисень в дутті, спрямований головним чином на інтенсифікацію горіння додаткового палива, масове застосування якого без комбінації з киснем неможливе.

Перелік використаних джерел

[1] Донсков Е.Г., Донсков Д.Е. К вопросу об интенсификации плавки при повышении давления газов на колошнике. *Производство чугуна на рубеже*

столетий : труды V Международного конгресса доменщиков, Днепропетровск-Кривой Рог, 7-12 июня 1999 г. Днепропетровск: «Пороги», 1999. С. 208-211.

[2] Доменная плавка под давлением, мифы и реальность / Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Донсков А.Д., Кассим Д.А. *Вісник Криворізького національного університету*. 2012. Вип. 33. С. 80-85.

[3] Эффективность использования интенсификаторов доменной плавки в предшествующие годы и на современном этапе / Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Донсков А.Д., Кассим Д.А. *Вісник Криворізького національного університету*. 2012. Вип. 33. С. 100-105.

[4] Лялюк В.П. Теория і технологія доменної плавки: навчальний посібник. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2020. 516 с.

[5] Крячко Г.Ю., Сігарьов Є.М. Робота доменних компресорів і фурменної зони доменних печей: монографія. Кам'янське: ДДТУ, 2024. 256 с.

[6] Шеремет В.А. Развитие доменного производства Криворожского государственного горно-металлургического комбината «Криворожсталь». *Теория и практика производства чугуна*: сб. тр. Междунар. научно-техн. конф., г. Кривой Рог, 24-27 мая 2004 г. КГТМК «Криворожсталь», 2004. С. 3-12.

PRESSURE BLAST MELTING AND BLOW ENRICHMENT WITH OXYGEN – PROCESS INTENSIFIERS OR AN UNFOUNDED TRIBUTE TO TRADITIONS

Kryachko G.Yu.

PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>, e-mail: nauka_m4m@ukr.net;

Sigarev Ye.M.

D.Sc. (Engineering), professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>, e-mail: en_sigarev@ua.fm

The fallacy of existing statements about the unfounded expediency of using increased gas pressure in the working space of blast furnaces and enriching the blast with oxygen as intensifiers of the blast furnace process is shown, due to the incorrect comparison of the operation of furnaces of different volumes, which operated under sharply different raw material and operating conditions. Using the example of two blast furnaces of the same enterprise, the volume of which differed by almost two times, it is shown that with an increase in the useful volume of the furnace, the value of increased gas pressure as a means of intensification of melting increases in comparison with units of lower capacity. The main reasons for the increase in the resistance of the charge column are given, which are associated with both a decrease in the volume fraction of coke in the "dry" zone of the furnace and a thinning of the coke "windows" in the cohesion zone with a decrease in the volume fraction of coke, an overestimation of the working height of blast furnaces of Soviet designs, and the need to create powerful tuyeres for the redistribution of tuyeres gas to the centre of the furnace with an increase in the power of the units. It is precisely to overcome the effects of negative factors in order to intensify blast melting that pressure blast furnace melting is widely used. The data obtained from the research results not only indicate the effectiveness of using increased gas pressure, but also indicate its differentiated effect on the intensity of melting in furnaces of different volumes. According to the results of the study, without involving an increase in gas pressure on the top as an intensifier of blast furnace melting, forcing the furnace stroke by blowing can be carried out only by increasing the unevenness of the radial gas distribution with excess coke consumption. It is shown that increasing the gas pressure in the working space of the furnaces and enriching the blow with oxygen are not antagonists, since they are aimed at overcoming negative changes of various nature that arose in the process of improving blast furnace melting.

Keywords: blast furnaces, intensifiers, gas pressure, resistance, enrichment, oxygen, blowing, forcing.

References

- [1] E.G. Donskov, and D.E. Donskov, «K voprosu ob intensifikatsii plavki pri povyshenii davleniya gazov na koloshnike» [«Regarding the intensification of melting when the pressure of gases on the furnace is increased»], in Proc. of the V Int. Congress of Blast Furnace Workers «Iron production at the turn of the century», Dnipropetrovsk-Kyryvyi Rih, 1999, pp. 208-211. (Rus).
- [2] E.G. Donskov, V.P. Lyaluk, A.D. Donskov, and D.A. Kassim, «Domennaya plavka pod davleniyem, mify i real'nost'» [«Blast furnace melting under pressure, myths and reality»], *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Journal of Kryvyi Rih National University*, vol. 33, pp. 80-85, 2012. (Rus).
- [3] E.G. Donskov, V.P. Lyaluk, A.D. Donskov, and D.A. Kassim, «Effektivnost' ispol'zovaniya intensifikatorov domЕННОY plavki v predshestvuyushchiye gody i na sovremennom etape» [«Effectiveness of blast furnace smelting intensifiers in previous years and at the present stage»], *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Journal of Kryvyi Rih National University*, vol. 33, pp. 100-105, 2012. (Rus).
- [4] V.P. Lyaluk, *Teoriya i tekhnolohiya domЕННОY plavky: navchal'nyy posibnyk* [Theory and technology of blast furnace smelting: a textbook]. Kyryvyi Rih, Ukraine: FOP Chernyavsky D.O. Publ., 2020. (Ukr.).
- [5] G.Yu. Kryachko, and Ye.M. Sigarev, *Robota domennykh kompresoriv i furmennoyi zony domennykh pechey: monohrafiya* [Operation of blast furnace compressors and tuyeres of blast furnaces: monograph]. Kamianske, Ukraine: DSTU Publ., 2024. (Ukr.).
- [6] V.A. Sheremet, «Razvitiye domennogo proizvodstva Krivorozhskogo gosudarstvennogo gorno-metallurgicheskogo kombinata «Krivorozhstal'» [«Development of the blast furnace production of the Kryvorozh State Mining and Metallurgical Combine «Krivorozhstal'»], in Proc. of the Int. sci.-pract. conf. «Theory and practice of cast iron production», Kyryvyi Rih, 2004, pp. 3-12. (Rus).

Стаття надійшла 26.03.2025

Стаття прийнята 05.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Крячко Г.Ю., Сігарьов Є.М. Доменна плавка під тиском і збагачення дуття киснем – інтенсифікатори процесу чи необґрунтована данина традиціям. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 50. С. 117-124. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336315>.

КОМПЛЕКСНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЧОРНИХ МЕТАЛІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

Плотніков В.В.	канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8791-874X , e-mail: plotnikov_vv@knu.edu.ua ;
Бабасєвська О.В.	ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6097-6449 , e-mail: babaevska_ua@knu.edu.ua ;
Савельєв С.Г.	д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6263-9422 , e-mail: saveliev_sg@knu.edu.ua ;
Бабошко Д.Ю.	канд. техн. наук, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3551-8785 , e-mail: baboshko_dyu@knu.edu.ua ;
Чубенко В.А.	канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3356-0285 , e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua

Запропоновано концепцію інноваційного металургійного підприємства, що ґрунтується на низці ключових принципів. Вуглець, що міститься у вугіллі, розглядається переважно як основний відновник для відновлення залізовмісних оксидів. Діоксид вуглецю використовується для газифікації вугілля. Відпрацьовані гази спрямовуються на генерацію електроенергії, яка забезпечує потреби сталеплавильного виробництва, включаючи процеси її розливання та формування. Для підтримання необхідного температурного режиму, що забезпечує ефективне відновлення заліза, застосовується низькотемпературна плазма. Основні технологічні етапи роботи такого інтегрованого заводу – газифікація вугілля, остаточне відновлення залізних оксидів, насичення заліза вуглецем, а також утворення шлаку та чавуну – реалізуються в межах одного пристрою, яким є плазмохімічний плавильний реактор. Продукти газифікації, що утворюються в реакторі, характеризуються високою температурою та сильними відновними властивостями, завдяки чому використовуються для нагріву й металізації окатишів. Виробництво сталі з гарячих металізованих окатишів і чавуну здійснюється в електродуговій печі з використанням електроенергії, отриманої з відпрацьованих після металізації газів, які мають високу температуру та незначний відновлювальний потенціал. Розливання і формування здійснюються за технологією, що виключає проміжне складування заготовок. Кінцевим продуктом такого виробництва є формований метал високої якості, яку неможливо забезпечити при виплавці конвертерним способом. Це приводить до економного споживання енергії та зменшення тривалості робочого циклу. Пропонований інтегрований завод чорної металургії характеризується раціональною схемою використання тепла з мінімізацією його втрат від охолодження агрегатів. Система виділення діоксиду вуглецю та його подальшого використання є найбільш раціональним використанням вуглецю, оскільки, на відміну від традиційних схем, в яких CO_2 викидається в атмосферу, в даному випадку він використовується для підвищення вмісту вуглецю в технологічному процесі. Така концепція відповідає сучасним тенденціям світового виробництва сталі.

Ключові слова: вуглець, газифікація, низькотемпературна плазма, металізація, плазмохімічний реактор, електродугова піч, електроенергія.

Постановка проблеми

Одним із основних моментів, що стимулює у наш час розвиток різноманітних способів металургії заліза, є різке скорочення запасів або повна відсутність у різних регіонах світу коксівного вугілля (точніше вугілля, з якого різними способами можна отримати металургійний кокс). Доменне виробництво не може існувати без використання коксу. Таким чином, у регіонах, що позбавлені можливості отримувати кокс, єдиною можливістю отримувати первинний метал є способи прямого відновлення заліза. При цьому вибір способу отримання металу залежить від конкретних умов (наявність та якість руд, запаси та вид палива, асортимент палива, асортимент металу та потрібні об'єми виробництва, енергетичні ресурси тощо) [1].

Виробництво та споживання енергії є однією із характеристик технічного прогресу та економічного

розвитку суспільства. До нашого часу базовим джерелом отримання енергії було органічне паливо: вугілля, нафта, природний газ, сланці, торф, деревина [2, 3]. Роль вугілля у світовому промисловому виробництві залежить від ряду факторів, найважливішими із яких є загальний розвиток виробництва та пов'язані з цим тенденції зростання споживання енергії; темпи впровадження нових технологічних енергозберігаючих процесів та машин; наявність запасів альтернативних енергетичних джерел; рентабельність розробки родовищ; їхнє географічне розташування, що визначає доцільність транспортування вугілля; темпи створення нової техніки для гірничо-геологічних умов, що безперервно погіршуються.

В запасях невідновних джерел енергії на частку вугілля припадає більше 90% геологічних запасів та близько 70-80% розвіданих. На частку нафти та природного газу відповідно більше 6% і близько 20%. При

цьому розвідані світові запаси нафти у 2013 р. склали 120 млрд т, і за річного споживання 2,9 млрд т їх вистачить трохи більше ніж на 40 років [4-6]. Розвідані запаси природного газу склали у 2013 р. від 90 до 100 млрд т (у нафтовому еквіваленті), таким чином за нинішнього рівня споживання їх також може вистачити лише на декілька десятків років [4-6].

Зважаючи на це, головний пріоритет виробництва товарного металу слід вбачати у мінімізації використання органічних невідновлюваних палив, що можливо й доцільно реалізувати за рахунок широкого застосування електричної енергії, отриманої шляхами, альтернативними до енергетики, що базується на спаленні органічних видів палива.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Класичні процеси безкоксової металургії заліза характеризуються високим рівнем споживання органічного палива [1, 7-8]. Найпоширеніший спосіб металізації окиснених окатишів – Midrex – потребує для здійснення реакцій відновлення оксидів заліза синтез-газ, отриманий шляхом конверсії природного газу. Тривалий час експлуатуються заводи прямого отримання заліза, що мають в своїй основі використання конвертованого природного газу. Проте запаси природного газу будуть вичерпані за декілька десятків років за умови збереження сучасних рівнів його споживання [2]. Подальша переробка металізованих окатишів у сталь здійснюється переважно в електродугових печах, джерелом живлення яких є електрична енергія, отримана, у більшості випадків, на електричних станціях, що використовують енергію реакції горіння органічного палива.

Виплавка чавуну за технологією, що передбачає використання комбінації «шахтна піч – плавильний газифікатор» (наприклад, Corex–процес), має низку істотних переваг. Найважливішими з них є повне усунення потреби в коксі та здатність системи адаптуватися до змін складу шихти. В технології Corex використовується плавильний газифікатор, що виконує функції газифікації вугілля та виробництва чавуну, при цьому можливе застосування вугілля різних марок [1, 7-8]. Цей аспект має велике значення, адже через зменшення запасів коксівного вугілля металургійні підприємства змушені шукати альтернативні джерела енергії й відновників для заміни традиційного коксу.

Сучасні заводи чорної металургії характеризуються раціональною схемою використання тепла. Найбільш вдала схема, на наш погляд, застосована на інтегрованому заводі фірми Saldanha Steel Co, де використовується установка Corex в поєднанні із шахтною піччю Midrex [1, 7-8]. Інтегрованість заводу дозволяє швидко й адекватно реагувати на зміну шихтових умов без коливань в якості кінцевого продукту завдяки доведення до мінімуму операцій проміжного складування. І хоча на сьогоднішній день схема такого заводу є вельми привабливою з точки зору вкладання

капіталу, проте все-одно в якості джерела теплової енергії для здійснення відновлювальних процесів, нагріву сировини і плавлення чавуну використовується енергетичне вугілля. В подальшому ефективність використання цієї схеми, на наш погляд, буде лише підвищуватись, однак одночасно буде зростати й ціна на товарний метал.

Мета статті

Мета статті полягає у створенні інтегрованого заводу, складовими модулями якого є процеси із якнай-вигоднішим використанням енергії, отриманої при неминучому вивільненні теплової енергії органічного палива; у застосуванні низькотемпературної плазми для здійснення процесів відновлення оксидів заліза; в організації рециркуляції діоксиду вуглецю як джерела вуглецю та окиснювача у процесах газифікації вугілля.

Виклад основного матеріалу

Концепція пропонованого заводу чорної металургії має основою використання в якості відновника вугілля різних марок. Такий вибір обґрунтовується декількома причинами. По-перше, запаси вугілля є найбільшими серед усіх видів органічного палива. По-друге, існує довга історія видобування вугілля, і, отже, розроблені різноманітні методи його видобутку в залежності від місцевих умов. По-третє, розроблені та відпрацьовані різні способи газифікації вугілля всіх марок, тобто виробництво синтез-газу для процесів прямого отримання заліза не є проблемою. По-четверте, у промислових масштабах успішно працюють установки Corex, що споживають неокисівне вугілля та виробляють чавун, що за якістю є аналогічним до доменного.

Для раціоналізації використання вугілля у процесі виробництва товарного металу розглянуто наступну концепцію сучасного металургійного заводу, основні тези якої наведені нижче:

1. Вугілець, що міститься у вугіллі, виконує, насамперед, роль відновника в процесах відновлення оксидів заліза.
2. Відпрацьований газ із низькою температурою проходить стадію очищення від вуглекислого газу.
3. Отриманий вуглекислий газ використовується в процесі газифікації вугілля.
4. Використаний газ застосовується для генерації електроенергії.
5. Згенерована електрична енергія спрямовується на внутрішні виробничі потреби, включаючи виготовлення сталі, її розливку та формування.
6. Для підтримання необхідного температурного режиму під час остаточного відновлення оксидів заліза застосовується концентроване джерело енергії – плазма з низькою температурою.

У пропонованій концепції вугілля використовується для здійснення реакцій відновлення оксидів заліза. Це пов'язане, в першу чергу, з недопущенням використання викопних органічних матеріалів в якості джерела

теплової енергії. Із плином часу запаси вугілля будуть скорочуватись, їх видобування буде складнішим, і, отже, ціни на таке органічне паливо будуть стрімко зростати. З огляду на це, тепла енергія, отримана шляхом спалювання органічного палива, буде дедалі дорожчою. На противагу цьому виступають альтернативні джерела енергії, передусім, електрична енергія.

Перетворення електричної енергії у теплову пропонується здійснювати в електричних нагрівачах газу – плазмотронах. Останні призначені для отримання низькотемпературної плазми. У пропонованій концепції плазма розглядається як заміник тієї частини органічного палива, тобто вугілля, що витрачається на досягнення потрібного теплового рівня процесу виробництва чавуну в установках із плавильним газифікатором. Одночасно з цим низькотемпературна плазма також відіграє значну роль як реагуюче середовище в реакціях газифікації вугілля.

Таким чином, створюються достатні умови для використання вуглецю вугілля як відновника у процесах відновлення оксидів заліза. Проте вугілля відіграє також і роль джерела теплової енергії, адже в ході реакцій газифікації виділяється значна частка тепла у загальному балансі його надходження.

У межах запропонованої концепції для виплавки чавуну передбачається використання плазмохімічного плавильного реактора. У цьому агрегаті послідовно відбуваються процеси газифікації вугілля, остаточного відновлення оксидів заліза, насичення заліза вуглецем та утворення розплавленого чавуну та шлаку. Основними продуктами реактора є рідкий чавун, шлак та газ із відновними властивостями.

Газ-відновник подається до шахтного агрегату, де використовується для попереднього нагрівання кускових залізорудних матеріалів. Завдяки високому відновлювальному потенціалу цього газу, в шахтному модулі також здійснюється часткове відновлення оксидів заліза.

Далі відпрацьований газ очищується від діоксиду вуглецю та надходить до шахтного агрегату глибокої металізації, на виході з якого отримують два потоки: окатиші з рівнем металізації, достатнім для подальшого переплаву в електродуговій печі, а також вторинний газ.

Металізовані окатиші та чавун завантажуються в електродугову піч, де проводиться виплавка сталі високої якості різних марок. Робота модуля печі забезпечується електроенергією, яку виробляє електрогенерувальна установка, інтегрована в структуру заводу. Ця установка трансформує як фізичне, так і хімічне тепло відпрацьованого газу в електроенергію.

Для розливання та формування товарного металу можуть бути використані широко розповсюджені машини безперервного лиття та прокатки сталі. Джерелом енергії для модулю розливання та формування слугує електрика, вироблена на згаданій електричній установці.

Технологічна схема пропонованого інтегрованого заводу зображена на рисунку 1. Вихідними сировинними матеріалами пропонованого інтегрованого

заводу є окиснені залізорудні окатиші, вугілля та різного роду добавки. Для виробництва чавуну потрібна також електрична енергія, що надходить від зовнішніх постачальників. Серед виробників електричної енергії перевага надається атомній та альтернативній відновлювальній енергетиці. Такий вибір постачальників обумовлюється дотриманням головного пріоритету, згідно з яким на виробництво товарного металу повинно витрачатись, навіть опосередковано, мінімум органічного невідновлюваного палива.

У рамках запропонованої технологічної концепції всі основні етапи – газифікація вугілля, фінальне відновлення оксидів заліза, навуглецювання, а також формування чавуну і шлаку – реалізуються в єдиному агрегаті, яким є плазмохімічний плавильний реактор. Газифікація палива відбувається як у середовищі низькотемпературної плазми, так і безпосередньо в шарі вугілля, розташованому на поверхні розплавленого металу. Вугілля надходить до реактора частково в порошкоподібному стані, а також у кусковому вигляді. Основними продуктами газифікації є чадний газ, водень та продукти їх окиснення.

Попередньо нагріті та частково металізовані залізорудні окатиші разом із певною частиною вугілля та флюсами надходять до плавильного реактора. У ході взаємодії з продуктами газифікації вугілля вони зазнають подальшого відновлення. Завершальна редукція та насичення заліза вуглецем відбувається в шарі вугілля. Розплавлене залізо, проходячи через вугільний і шлаковий шари, збагачується вуглецем і одночасно піддається десульфурзації. Оскільки в якості відновника використовується вугілля, кількість сірки в системі є значною, тому для ефективного її видалення необхідне створення шлаку з високою основністю.

Під час нагрівання та відновлення залізорудної сировини відбувається розклад кальцієвих і магнієвих карбонатів, у результаті чого утворюється активне м'якшувальне вапно. Його разом з окатишами завантажують у плавильний реактор для утворення шлаку необхідної хімічної структури. Для коригування складу та основності шлаку додаються й інші шлакоутворюючі матеріали.

Продукти газифікації, що утворюються в реакторі, мають високу температуру та потужний відновний потенціал. Після очищення від сірковмісних сполук газ використовується в модулі попереднього нагрівання та відновлення окатишів, при цьому він насичується водяною парою й діоксидом вуглецю. Після цього газ очищується від діоксиду вуглецю, зберігаючи відновлювальні властивості, але втрачаючи температуру, необхідну для ефективного металізації. Виділений CO_2 знову подається до реактора, де бере участь у газифікації вугілля, виконуючи функції окисника. Це дозволяє зменшити витрату вугілля. Необхідна тепла енергія для цього процесу забезпечується плазмою низькотемпературного типу. Отримані чавун і шлак виводяться з агрегату: чавун – на сталеплавильну стадію, шлак – на складування.

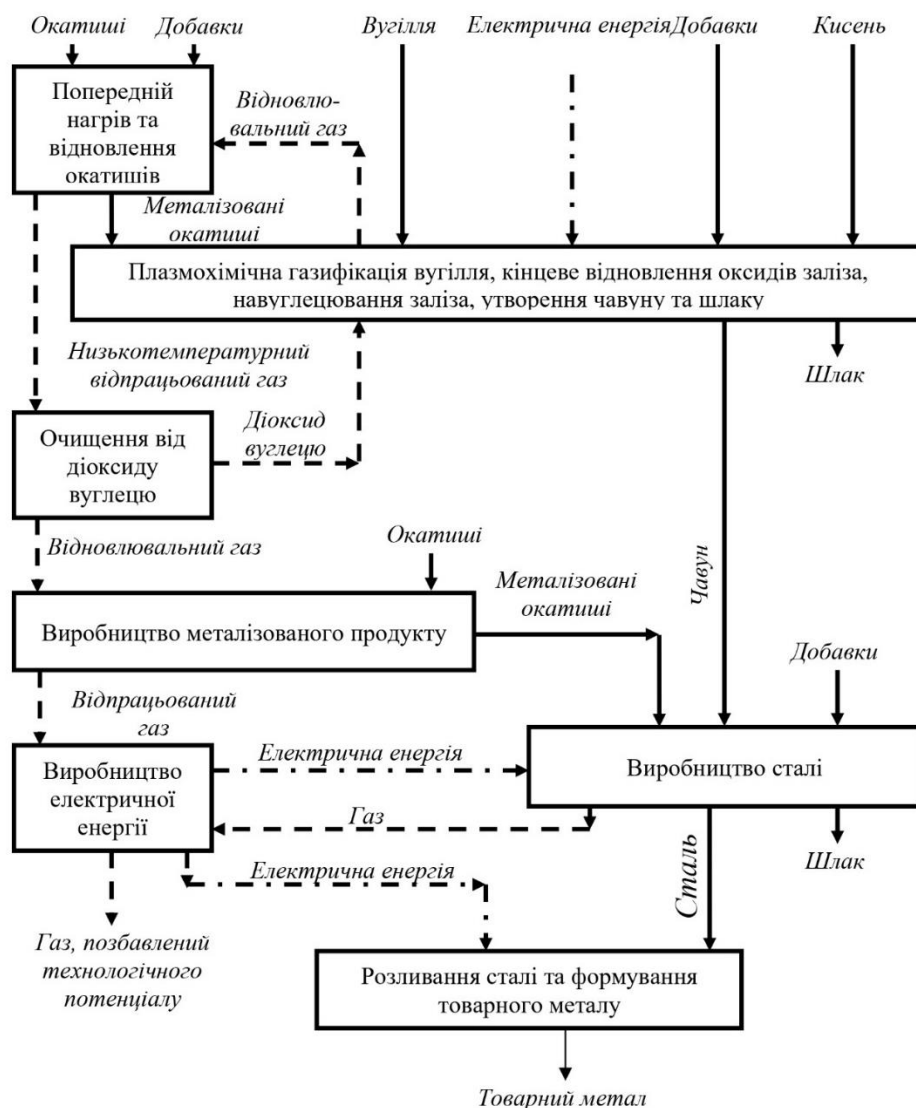


Рис. 1 – Технологічна схема інтегрованого пропозиційного заводу з виробництва товарного металу з використанням низькотемпературної плазми

Очищений відпрацьований газ, після повторного нагрівання за допомогою залишкового тепла з реактора, подається на модуль металізації, де він взаємодіє з окатишами, формуючи гарячий металізований продукт. Завдяки температурним умовам транспортування продукту до сталеплавильного етапу виключається самозаймання губчастого заліза.

Вторинний газ, який утворюється після металізації, має високу температуру, проте низький відновний потенціал. Його енергетична цінність є невисокою, тому він використовується як джерело тепла для виробництва електроенергії. Для цього застосовуються як хімічна, так і фізична енергія газу. Попри те, що використання цього газу для генерації електроенергії частково суперечить початковим пріоритетам процесу, така операція забезпечує раціональне використання

ресурсів. Відпрацьований газ після генерації електроенергії очищується та викидається в атмосферу.

Сталеплавильне виробництво базується на використанні чавуну та металізованих окатишів як основної сировини. Центральним агрегатом є електродугова піч, що дозволяє досягти високих стандартів якості сталі, яких неможливо досягти у кисневих конвертерах. Електродугова піч живиться електроенергією, що генерується з технологічного газу, який утворюється під час виплавки сталі. Цей газ, завдяки своїй високій теплоті згорання, використовується для подальшого виробництва електроенергії. Додатково в піч подаються легуючі та шлакоутворювальні добавки для регулювання складу шлаку. Отримана сталь надходить на розливання і формування, а шлак відправляється на утилізацію.

Для здійснення операції розливання та формування товарного металу використовується, головним чином, електрична енергія. Вона надходить з операції виробництва електричної енергії, що включена до схеми пропонованого інтегрованого заводу чорної металургії. Розливання і формування здійснюються за технологією, що виключає проміжне складування

заготовок. Це призводить до економного споживання енергії та зменшення тривалості робочого циклу. Кінцевою продукцією цієї операції є формований метал.

Схема ланцюга апаратів пропонованого інтегрованого заводу чорної металургії зображена на рисунку 2.

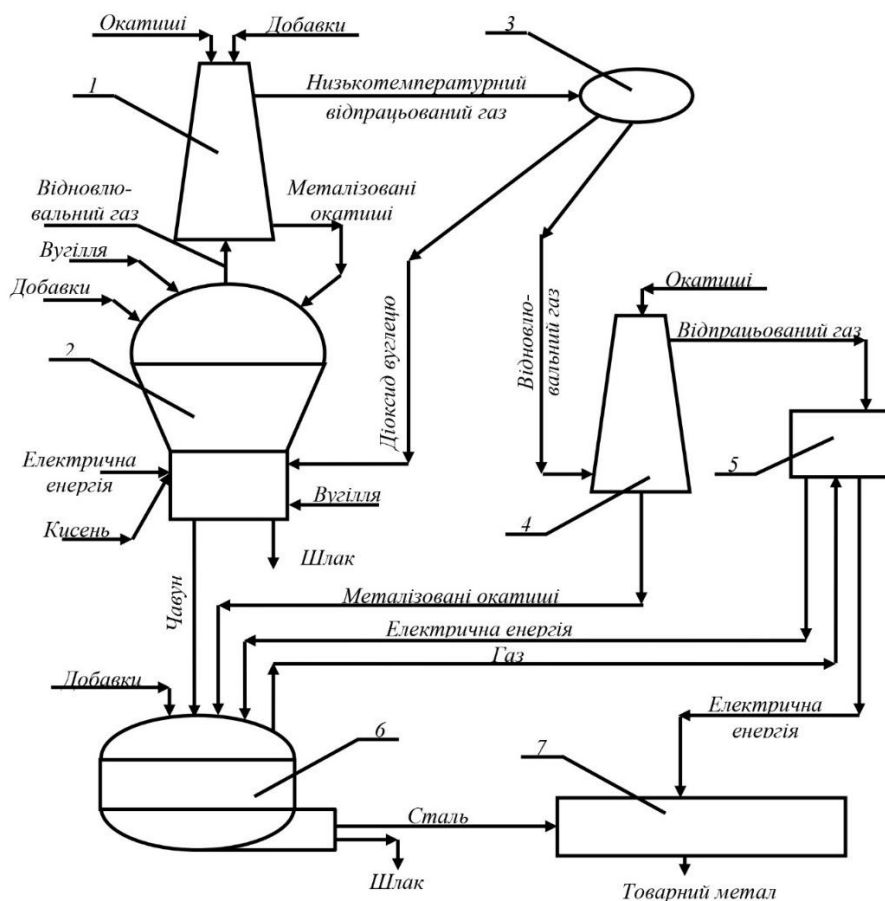


Рис. 2 – Схема ланцюга апаратів пропонованого заводу: 1 – відновлювальний агрегат шахтного типу; 2 – плазмохімічний плавильний реактор; 3 – пристрій для очищення потоку газу від діоксиду вуглецю; 4 – відновлювальний агрегат шахтного типу; 5 – електрична станція; 6 – електродугова піч; 7 – стан розливання та формування товарного металу

Окиснені окатиші разом із вапняком завантажуються у відновлювальний агрегат шахтного типу 1 (рис. 2), в який також надходить відновлювальний газ із плазмохімічного плавильного реактора 2. Агрегат шахтного типу 1 призначений для утилізації тепла відхідних газів плазмохімічного плавильного реактора 2. Відновлювальний газ має відновлювальний потенціал, тому разом із процесами теплообміну здійснюється також попереднє відновлення оксидів заліза. Паралельно із цим відбувається дисоціація карбонатів вапняку. Завдяки відносно невисокій температурі газу в агрегаті шахтного типу 1 здійснюється м'який випал вапна. Це призводить до отримання вапна, що має високу реакційну здатність.

Попередньо відновлені окатиші та вапно завантажуються до плазмохімічного плавильного реактора 2. Разом з цим завантажуються частина вугілля та добавки для коригування властивостей шлаку. В нижній частині плазмохімічного плавильного реактора 2 радіально встановлені плазмотрони (на рисунку 2 не зображені) аналогічно до фурм плавильного газифікатора установки Corex. До плазмотрону підводиться електрична енергія та плазмоутворюючий газ – кисень. В утворену в плазмотроні плазму вводиться частина вугілля у вигляді порошку. У плазмовому струмені здійснюються реакції газифікації вугілля з утворенням відновлювальних у відношенні до оксидів заліза газів. На виході із плазмотрону низькотемпературна киснева

плазма віддає своє тепло шару з вугілля та попередньо відновлених окатишів. При цьому кисень переходить з іонізованого стану у молекулярний. Зустрічаючи на своєму шляху вугілля, кисень реагує з ним з утворенням продуктів газифікації, переважно монооксиду вуглецю та водню. Продукти плазмохімічної та молекулярної газифікації взаємодіють з нагрітими попередньо відновленими окатишами. В результаті окиснені окатиші перетворюються на металізовані до високого ступеня металізації. Паралельно здійснюються процеси науглецювання свіжовідновленого заліза, а також процеси шлакоутворення. Шлак стікає крізь вугілля та окатиші та розташовується під ними. Шлак безперервно перемішується завдяки надходженню у робочий простір плазмохімічного плавильного реактора 2 низькотемпературної плазми. Таким чином досягається гомогенізація шлаку, що позитивно впливає на його сіркопоглинальну здатність.

Тепло, що надходить від струменів низькотемпературної плазми та реакції газифікації вугілля, поглинається металізованими окатишами. Внаслідок цього утворюються краплини чавуну, що проходять крізь шар вугілля, і піддаються подальшому науглецюванню. Потрапляючи у шар шлаку, чавун очищується від сірки та стікає у нижню частину плазмохімічного плавильного реактора.

Продукти газифікації вугілля після кінцевого відновлення попередньо відновлених окатишів надходять у верхню частину плазмохімічного плавильного реактора 2, втрачають там швидкість і видаляються з робочого простору. Цей газ має високу температуру та відновлювальний потенціал. З метою зробити використання цього газу у відновлювальному агрегаті шахтного типу 1 можливим, відновлювальний газ піддається охолодженню та очищенню від пилу та сполук сірки. Очищений та охолоджений відновлювальний газ подається у нижню частину агрегату 1. Утворений у плазмохімічному плавильному реакторі 2 шлак складається для подальшої переробки, а чавун направляється на виробництво сталі.

На виході з відновлювального агрегату 1 є низькотемпературний відпрацьований газ, що має низький відновлювальний потенціал, однак містить ще деяку кількість відновлювачів. Для забезпечення можливості використання цього газу як відновного агента він надходить у пристрій очищення потоку газу від діоксиду вуглецю 3. В цьому пристрої здійснюється виділення діоксиду вуглецю, й, тим самим, відбувається збагачення потоку газу відновниками. На виході з пристрою 3 існують два потоки: потік діоксиду вуглецю та потік відновлювального газу. Перший потік є джерелом вуглецю та виступає в ролі окисника, тому спрямовується у плазмохімічний плавильний реактор 2. Другий потік являє собою низькотемпературний відновлювальний газ. Для підвищення його температури здійснюється раціональний теплообмін між ним та відновлювальним газом, що надходить з плазмохімічного плавильного газифікатора 2. Таким чином вдається уникнути

неекономного використання надлишкового тепла високо нагрітого відновлювального газу.

Нагрітий до оптимальної температури відновлювальний газ із пристрою 3 надходить до відновлювального агрегату шахтного типу 4. Також у цей агрегат завантажуються окиснені окатиші. Відновлювальний газ, рухаючись назустріч потоку окиснених окатишів, відновлює їх. При цьому досягається такий ступінь металізації окатишів, що їх економічно доцільно переплавляти у сталь. На виході з відновлювального агрегату шахтного типу 4 існує потік відпрацьованого газу. Він має низький вміст відновників і тому не придатний для подальших відновлювальних процесів. Проте відпрацьований газ має високу температуру та приховану енергію хімічного перетворення, що дозволяє використовувати його як джерело енергії для виробництва електричної енергії.

Виробництво електричної енергії здійснюється на електричній станції 5.

Чавун та отримані у відновлювальному агрегаті шахтного типу 4 металізовані окатиші завантажуються в електродугову піч 6. Разом з цим здійснюється завантаження добавок для наведення властивостей шлаку. В електродуговій печі 6 здійснюються процеси виробництва сталі, шлаку, а також газу, що складається переважно з монооксиду вуглецю. Цей газ спрямовується на електричну станцію 5 для виробництва електричної енергії. Сталь надходить на стан розливання та формування товарного металу 7. Тут здійснюються остаточні операції з надання сталі товарного виду у вигляді прокату. Стан 7 споживає електричну енергію, що отримана на електричній станції 5.

Для забезпечення нормального функціонування пропонованого заводу існує замкнений цикл водопостачання.

Схематично плазмохімічний плавильний реактор зображений на рисунку 3.

У плазмохімічний плавильний реактор згори завантажуються попередньо відновлені окатиші, добавки та частину вугілля. Маючи достатню потенціальну енергію вони проходять зону зниження тиску відновленого газу, де швидкість руху газу не надто загальмовує подальше падіння кускових матеріалів. Зона зниження тиску газу розташовується у сферичній частині плазмохімічного плавильного реактора. Опускаючись донизу, потенціальна енергія кускових матеріалів стає співвимірною із кінетичною енергією газу, що рухається вгору. Рівність енергій свідчить про можливість утворення псевдозрідженого шару 1 (рис. 3). Він складається з кусків вугілля, попередньо відновлених окатишів, добавок та газової фази, що представлена продуктами газифікації вугілля. У псевдозрідженому шарі відбувається інтенсивний нагрів вугілля, добавок та попередньо відновлених окатишів. Останні також піддаються відновленню з утворенням металічного заліза. Відновлення здійснюється як прямим, так і непрямым шляхом. Також у псевдозрідженому шарі відбувається первинне науглецювання металізованих окатишів.

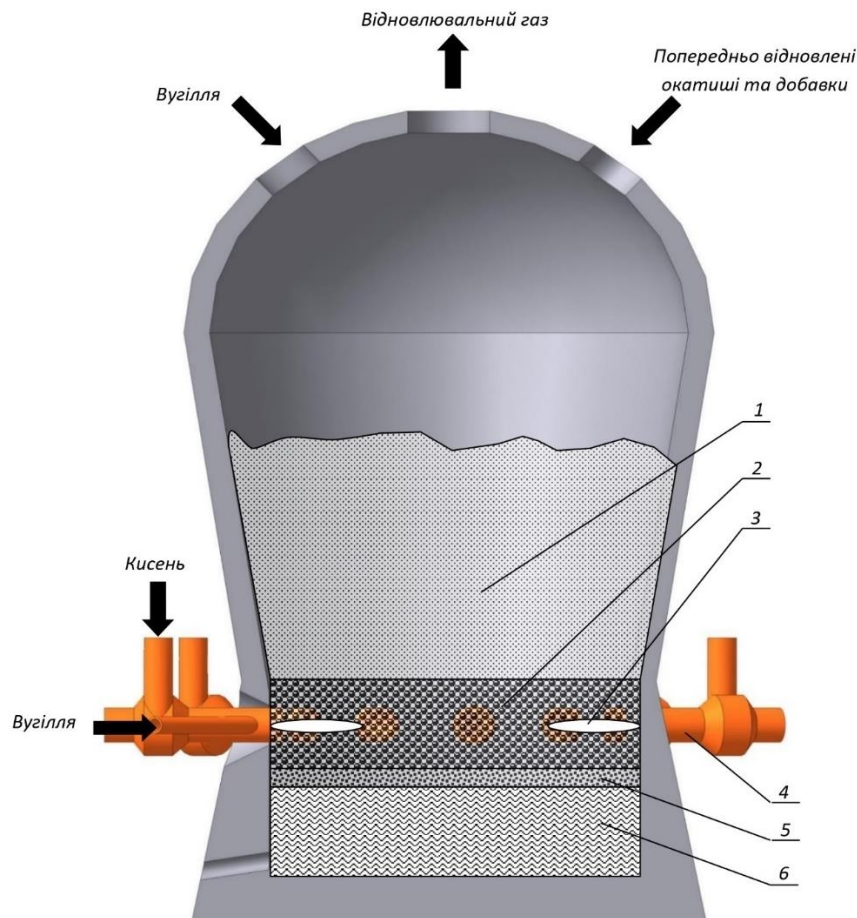


Рис. 3 – Плазмохімічний плавильний реактор: 1 – псевдозріджений шар; 2 – шар вугілля та окатишів; 3 – потік низькотемпературної плазми; 4 – плазмотрон; 5 – шар шлаку; 6 – шар чавуну

Псевдозріджений шар виконує також функцію сепарації газового потоку від дрібних кусків залізородного матеріалу. Це відбувається завдяки високій інтенсивності протікання процесів тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі, що зменшує винесення дрібних частинок залізородного матеріалу з плазмохімічного плавильного реактора. Дрібні частинки нагріваються, відновлюються й в потоці газу розплавляються. Рух потоку газу організований таким чином, що відбувається його обертання навколо вертикальної осі. Краплини металу мають більшу густину, ніж кускові матеріали у псевдозрідженому шарі, тому вони притискаються до внутрішніх стінок плазмохімічного плавильного реактора. Далі краплини металу стікають стінками та потрапляють у шар вугілля та окатишів 2.

Металізовані окатиші, краплини металу, непрореаговане вугілля та добавки з псевдозрідженого шару 1 надходять у шар вугілля та окатишів 2. У цьому шарі здійснюються процеси газифікації вугілля, прямого та непрямого кінцевого відновлення окатишів, навуглюювання окатишів, утворення чавуну та шлаку.

У шар вугілля та окатишів 2 надходить потік низькотемпературної плазми 3. Низькотемпературна

плазма утворена в плазмотроні 4. До плазмотрону 4 надходить електрична енергія та плазмоутворюючий газ – кисень. Кисень підводиться тангенціально, утворюючи тим самим закручений потік. Електричний розряд у плазмотроні перетворює потік молекулярного кисню у низькотемпературну плазму з температурою 3000-5000 К. В утворений потік плазми надходить подрібнене вугілля у вигляді порошку, що зважений у потоці газу. Потрапляючи у потік низькотемпературної плазми, холодна частинка вугілля внаслідок великого термічного напруження, що виникає всередині неї, руйнується з утворенням декількох уламків. Такий процес термічного подрібнення приводить до збільшення поверхні частинок вугілля, а це, в свою чергу, приводить до збільшення площі розділу твердої та газової фаз, і, отже, підвищується реакційна здатність вугілля. При подальшому швидкому нагріві частинки вугілля звільняються від легких і перетворюються на кокс. Газифікація коксового залишку вугілля здійснюється за участі радикалів. Отриманий у низькотемпературній плазмі синтез-газ характеризується високим вмістом монооксиду вуглецю та водню. У газовій фазі відбуваються також газофазні реакції, які призводять до

деякого зменшення відновлювального потенціалу синтез-газу.

На виході з плазмотрону існують потоки синтез-газу та плазмоутворюючого газу, що не прореагував. Непрореагований кисень у вигляді потоку низькотемпературної плазми віддає тепло шару вугілля та окатишів 2, і при цьому перетворюється на молекулярний кисень. Останній реагує з кусками вугілля, газифікуючи їх. Синтез-газ та продукти газифікації вугілля молекулярним киснем відновлюють окатиші до металічного заліза. Останнє науглецьовується і, завдяки теплу низькотемпературної плазми, синтез-газу та продуктів газифікації, розплавляється. Утворенню металічного розплаву передують процеси утворення шлаку, який має нижчу температуру плавлення. Краплини шлаку проходять крізь шар вугілля та окатишів 2 й стікають у шар шлаку 5.

Розплавлені краплини чавуну проходять крізь шар вугілля та окатишів 2, де остаточно науглецьовуються. Чавун проходить крізь шар шлаку 5, де відбуваються реакції десульфурації. Очищений від сірки чавун стікає у шар чавуну 6. Готовий чавун разом зі шлаком зливають із робочого простору плазмохімічного плавильного реактора.

Висновки

Таким чином, використання запропонованої концепції дозволить створити інтегрований завод із виробництва товарного металу з мінімумом використання органічних невідновлюваних компонентів, широким застосуванням електричної енергії та досить гнучким підлаштуванням під зміни сировинних умов із забезпеченням незмінної якості товарного металу.

Пропонований інтегрований завод чорної металургії відповідає сучасним тенденціям щодо економії природних ресурсів, характеризується раціональністю використання теплової енергії та відновлювального

потенціалу газів, відрізняється виробництвом електричної енергії, що споживається у процесах виробництва сталі та товарного металу. Система виділення діоксиду вуглецю та його подальшого використання є найбільш раціональним використанням вуглецю. В даному випадку він підвищує вміст вуглецю в продуктах газифікації у порівнянні з іншими способами газифікації.

Перелік використаних джерел

- [1] Бондаренко Б.И., Шаповалов В.А., Гармаш Н.И. Теория и технология бескоксовой металлургии. К. : Наукова думка, 2003. 535 с.
- [2] Бережний М.М., Хіноцька А.А. Паливо та металургійні печі : монографія. Кривий Ріг : Діонат (ФОП Чернявський Д.О.), 2012. 380 с.
- [3] Хейфец Р.Г., Куваев Г.Н. Теплоэнергетика металлургических заводов : уч. пособ. Д. : НМетАУ, 2000. 66 с.
- [4] 4BP Statistical Review of World Energy. June 2014. Energy in 2013: Taking stock. URL: [https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20\(1\).pdf](https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20(1).pdf) (дата звернення: 03.04.2025).
- [5] Маркевич К., Омельченко В. Глобальні енергетичні тренди крізь призму національних інтересів України : аналітична доповідь. К. : Заповіт, 2016. 118 с.
- [6] Запаси та видобування кам'яного вугілля. URL: https://eti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya_2022/ (дата звернення: 03.04.2025)
- [7] Безкоксowa металургія заліза : підручник / Іващенко В.П., Величко О.Г., Терещенко В.С., Чеченев В.А. Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. 338 с.
- [8] Губін Г.В., Півень В.О. Сучасні способи безкоксowej металургії заліза. Кривий Ріг, 2010. 336 с.

INTEGRATED TECHNOLOGY FOR FERROUS METAL PRODUCTION USING LOW-TEMPERATURE PLASMA

Plotnikov V.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8791-874X , e-mail: plotnikov_vv@knu.edu.ua ;
Babaievska O.V.	senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6097-6449 , e-mail: babaievska_ua@knu.edu.ua ;
Saveliev S.G.	D.Sc. (Engineering), professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6263-9422 , e-mail: saveliev_sg@knu.edu.ua ;
Baboshko D.Yu.	PhD (Engineering), Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3551-8785 , e-mail: baboshko_dyu@knu.edu.ua ;
Chubenko V.A.	PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3356-0285 , e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua

A concept of a modern metallurgical plant is proposed, based on the following key principles: the carbon in coal is primarily considered as a reducing agent for the reduction of iron oxides; carbon dioxide is utilized for coal gasification;

off-gases are used for electricity generation, which supplies the energy needs of steel production, casting, and forming; low-temperature plasma is applied to maintain the required thermal level of the iron reduction processes. The core operations of the proposed integrated plant include coal gasification, final reduction of iron oxides, carburization of iron, and the formation of pig iron and slag — all carried out in a single unit: a plasma-chemical smelting reactor. The gasification products formed in the reactor possess high temperature and reducing potential and are directed toward heating and metallization of pellets. Steel is produced from hot metallized pellets and pig iron in an electric arc furnace using electricity generated from the high-temperature, low-reducing-potential off-gas produced after the metallized product stage. Casting and forming are carried out using a technology that eliminates intermediate billet storage, resulting in energy savings and shorter production cycles. The final result of such production yields a high quality of metal which cannot be achieved by smelting using the converter method. The proposed integrated ferrous metallurgy plant features an efficient thermal utilization scheme with minimized heat losses from equipment cooling. The system for CO₂ capture and its subsequent use represents the most rational use of carbon, since, unlike conventional systems where CO₂ is emitted into the atmosphere, it is reused to increase the carbon content in the technological process. This concept is in line with modern trends in global steel production.

Keywords: carbon, gasification, low-temperature plasma, metallization, plasma-chemical reactor, electric arc furnace, electricity.

References

- [1] B.I. Bondarenko, V.A. Shapovalov, and N.I. Garmash, *Teoriya i tekhnologiya beskoksovoy metallurgii* [Theory and technology of coke-free metallurgy]. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 2003. (Rus.)
- [2] M.M. Berezhny, and A.A. Khinotska, *Palyvo ta metallurhiyni pechi: Monohrafiya* [Fuel and metallurgical furnaces: Monograph]. Kryvyi Rih, Ukraine: Dionat (FOP Chernyavskyi D.O.) Publ., 2012. (Ukr.)
- [3] R.G. Kheifets, and G.N. Kuvaev, *Teploenergetika metallurgicheskikh zavodov* [Thermal power engineering of metallurgical plants: Textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: NMetAU Publ., 2000. (Rus.)
- [4] BP Statistical Review of World Energy. June 2014. Energy in 2013: Taking stock. [Online]. Available: [https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20\(1\).pdf](https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20(1).pdf). Accessed on: April 03, 2025.
- [5] K. Markevich, and V.Omelchenko, *Hlobal'ni enerhetychni trendy kriz' pryzmu natsional'nykh interesiv Ukrainy: analitychna dopovid'* [Global energy trends through the prism of national interests of Ukraine: analytical report]. Kyiv, Ukraine: Zapovit Publ., 2016. (Ukr.)
- [6] Coal reserves and extraction. [Online]. Available: <https://eti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya> 2022/. Accessed on: April 03, 2025.
- [7] V.P. Ivashchenko, O.G. Velichko, V.S. Tereshchenko, and V.A. Chechenev, *Bezkoksova metallurhiya zaliza: pidruchnyk* [Coke-free iron metallurgy: textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: RVA «Dnipro-VAL» Publ., 2002. (Ukr.)
- [8] G.V. Gubin, and V.O. Piven, *Suchasni sposoby bezkoksovoyi metallurhiyi zaliza* [Modern methods of coke-free iron metallurgy]. Kryvyi Rih, Ukraine, 2010. (Ukr.)

Стаття надійшла 23.04.2025

Стаття прийнята 07.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Комплексна технологія виробництва чорних металів із застосуванням низькотемпературної плазми / В.В. Плотніков та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 125-133. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336317>.

ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ ПЛАВЛІННЯ МЕТАЛУ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧАХ

Дан Л.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1954-4871 , e-mail: danleonid.alex@gmail.com ;
Трофімова Л.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4576-2589 , e-mail: trofimova.pstu@gmail.com ;
Грек К.Р.	студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

Представлена робота присвячена аналізу можливості повернення частки електричної енергії, що витрачається під час проведення плавки металів в електричних печах, конкретно – в електродугових. Відомо, що при виплавці металу в електродугових (особливо в електродугових) виділяється значна кількість пилу та газів, що мають високу температуру. Вихід газів та їх склад залежить від складу шихти, швидкості плавлення, технологічного та температурного режимів плавки, режиму кисневої продувки та ін. Для електросталеплавильного виробництва є характерним вміст у відхідних від печей газах дрібнодисперсного пилу, який найбільше виділяється під час продувки металу киснем. Інша сторона питання – теплові викиди в навколишнє середовище. Глобальне потепління вимагає швидкого та ефективного вирішення цієї проблеми. Використання тепла, що виноситься з плавильного об'єму електродугових печей, може, по-перше, дати можливість економити енергоресурси для технологічних цілей «in - situ», а, по-друге, – забезпечувати гарячою водою, парою, електроенергією як зовнішніх промислових, так і побутових споживачів. Одним із перспективних методів утилізації цього тепла є використання термоелектричних явищ, зокрема, ефекту Зеебека. Обладнання, що працює на цьому ефекті, дозволяє перетворювати теплову енергію в електричну і це може бути використано для підвищення енергоефективності виробництва. У роботі проаналізовані теоретичні засади використання термоелектричних перетворювачів у цілому та при утилізації тепла газів, що відходять від плавильних печей конкретно. На підставі передового досвіду розрахована електрична потужність блока перетворювачів, наведена принципова схема підключення термоелектричних перетворювачів до електромережі та їх монтажна схема.

Ключові слова: електродугова піч, енергетичний баланс, ефект Зеебека, термоелектричний перетворювач.

Постановка проблеми

Ефективність плавки, в тому числі в електричних печах, можна оцінити на підставі аналізу її енергетичного/теплового балансу. Енергетичний баланс складається з прибуткових і витратних частин, взятих за час однієї плавки.

Проаналізуємо статті підведення та витрат тепла, що мають місце при плавці сталі в електродуговій печі ДСП-3 [1].

Статті підведення: тепло, що виділяється при горінні електричної дуги, тепло екзотермічних реакцій.

Статті витрат зображено на діаграмі рис. 1. Як свідчить діаграма, основна частка витрат тепла припадає на тепло сталі (46,2%) і тепло, що йде з пічними газами (17%). Сумарні втрати тепла через стіни, подину і склепіння складають 12,7%. По даним авторів [2] піч ДСП-3 лише за період плавлення з газами виділяє 722 МДж тепла.

Загальна кількість тепла, що втрачається з газами, що відходять, за час плавки, порівняно мало залежить від режиму плавки. Частка цієї величини в енергетичному балансі ДСП зростає зі збільшенням місткості та потужності ДСП. На печах невеликої та середньої потужності місткістю 3-50 т за період плавки становить 15-20% [1].



Рис. 1 – Структурна діаграма витрат тепла [1]

Таким чином, вочевидь, тепло газів, що виходять з плавильного простору печі, є вельми перспективним енергоносієм.

Статистика свідчить, що приблизно одна третина теплової енергії, споживаної в промисловості, викидається у вигляді теплових втрат в атмосферу або в системах охолодження [3]. Ці втрати є наслідком недосконалості та неможливості використання й утилізації в

наявному процесі всіх теплових потоків. Значну частину з них становлять теплові відходи, які, однак, є непридатними для використання або розсіюються у вигляді випромінювання. Їх утилізація на сучасному рівні технологій не є доцільною ні з практичної, ні з економічної точок зору.

Утилізація тепла газів, що відходять від паливних печей, зазвичай базується на нагріванні в рекуператорах або в регенераторах повітря, яке використовується для спалення газу чи мазуту. Для електричних печей потреби нагрівати повітря немає, тому газ, що має температуру приблизно 1500°C, попросту викидають у навколишнє повітря. Інколи це тепло частково використовують для отримання пари при генерації електричної енергії. В цьому випадку в атмосферу потрапляє газ при температурі приблизно 300°C, що теж не є припустимим.

На наш погляд, цікавим з точки зору використання низькотемпературних теплових відходів під час вироблення електроенергії є використання термоелектричного ефекту (ефекту Зеебека). Ось ключові аргументи на користь цього:

1. Простота та надійність. Термоелектричні перетворювачі (ТЕП) не мають рухомих частин, що знижує витрати на обслуговування та підвищує довговічність; вони компактні та можуть бути інтегровані в існуючі системи без значних змін.

2. Утилізація низькопотенційного тепла. Плави́льні печі випромінюють велику кількість тепла (300–600°C і вище), яке часто просто виводиться через димар. ТЕП можуть перетворювати частину цієї енергії на електрику.

3. Екологічність за рахунок зменшення викидів CO₂ і використання відхідного тепла для генерації електроенергії.

4. Додаткове джерело енергії. Згенерована електроенергія може живити допоміжні системи печі (наприклад, вентилятори, датчики), знижуючи споживання з мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Явище Зеебека відкрито в 1821 р. і полягає в тому, що в термопарах, спаї яких перебувають за різних температур, виникає термоелектрорушійна сила (термоЕРС).

Відомо, що, якщо вздовж провідника існує градієнт температур, то електрони на гарячому кінці набувають вищих енергій і швидкостей, ніж на холодному; у напівпровідниках на додаток до цього концентрація електронів провідності зростає з температурою. У результаті виникає потік електронів від гарячого кінця до холодного і на холодному кінці накопичується негативний заряд, а на гарячому залишається некомпенсований позитивний заряд [4]. Процес накопичення заряду триває доти, доки різниця потенціалів, що виникла, не утворить потік електронів у зворотному напрямку, що дорівнює первинному, завдяки чому встановиться

рівновага [4]. В електричному колі, складеному з різних провідників, виникає термоЕРС, якщо місця контактів підтримуються при різних температурах. Коли коло замкнене, у ньому протікає електричний струм (визначається як термострум), причому зміна знаку у різниці температур спаїв супроводжується зміною напрямку термоструму. Величина термоЕРС залежить від абсолютних значень температур спаїв, різниці цих температур, а також від природи матеріалів, що утворюють термоелемент, оскільки саме вона визначає їх характеристики. Найважливішими характеристиками термоелектричних матеріалів є наступні [4].

Термоелектрична здатність (ZT). Визначається формулою:

$$ZT = (S^2\sigma T)/\lambda, \quad (1)$$

де S – коефіцієнт Зеебека;

σ – електропровідність;

λ – теплопровідність;

T – температура, К.

Чим вище ZT, тим ефективніший матеріал.

Електропровідність (σ) – високе значення сприяє кращій генерації енергії.

Теплопровідність (λ) – низька теплопровідність підвищує ефективність.

Коефіцієнт Зеебека (S) – високе значення вказує на здатність матеріалу генерувати напругу при температурному градієнті.

Розглянемо найбільш використовувані матеріали, що мають термоелектричні властивості [5–8].

1. *Традиційні термоелектричні матеріали.*

Вісмуту телурид (Bi₂Te₃) та його сплави:

- Широко використовуються в кімнатних та низькотемпературних умовах.

- Висока термоелектрична здатність ($ZT \sim 1$).

- Використовуються для охолодження та генерації енергії.

Свинцю телурид (PbTe):

- Ефективний при середніх температурах (до 500°C).

- $ZT \sim 0,8–1,2$.

- Використовується в промислових додатках.

Силіциди (наприклад, Mg₂Si, MnSi_{1.75}):

- Екологічно безпечні та дешеві.

- $ZT \sim 0,7–1,0$.

- Використовуються в середньотемпературних умовах.

2. *Новітні матеріали.*

Складні оксиди (наприклад, NaCo₂O₄, Ca₃Co₄O₉):

- Витримують високі температури.

- $ZT \sim 0,3–0,7$.

- Використовуються в високотемпературних умовах.

Складні халькогеніди (наприклад, Cu₂Se, SnSe):

- Висока ефективність при високих температурах.

- $ZT \sim 1,5–2,6$ (для SnSe).

- Перспективні для промислового застосування.

Термоелектричні полімери (наприклад, PEDOT:PSS):

- Гнучкі та легкі.
- $ZT \sim 0,1-0,4$.
- Використовуються у переносних пристроях та електроніці.

3. Наноструктуровані матеріали.

Наноструктуровані вісмуту телуриди та свинцю телуриди:

- Покращують ефективність за рахунок зменшення теплопровідності.
- ZT може досягати 1,5-2,0.

4. Квантові точки та нанокомпозити.

- Забезпечують високу ефективність за рахунок квантових ефектів.

Вочевидь, що вибір матеріалу залежить від умов експлуатації та вимог до ефективності.

Термоелектричні технології існують уже досить давно, але їх використання обмежене низькою ефективністю та високими витратами. Більшість генеруючих систем, заснованих на цьому методі, мають ККД 2-5% і здебільшого використовуються для живлення обладнання космічних кораблів або у віддалених районах [4]. Проте сучасні розробки в галузі нанотехнологій дають змогу отримати матеріали, за допомогою яких можливо досягти ефективності 15% і вище.

Фірмою Smart E5 GmbH [9] було розроблено схему генерації електричної енергії в термоелектричних перетворювачах за рахунок використання тепла гарячих газів. Гази, що утворюються під час плавлення металу в електропечах і початково мають температуру 400°C , за температури $\sim 200-190^{\circ}\text{C}$ спрямовують у початковий контур термоелектричного перетворювача. У вторинному контурі циркулює вода з температурою $\sim 30-40^{\circ}\text{C}$. За рахунок отриманого градієнта температури пристрій генерує електричний струм. Середня потужність блоку перетворювачів моделі ERS 200 PPC, що були встановлені на плавильному майданчику ливарного цеху, за вимірами авторів [9] становить до 90 кВт. Крім того, нагріта до 40°C вода може бути використана на побутові цілі. Таким чином, з одного боку, істотно підвищується енергоефективність роботи печей, а з іншого – зменшується негативний вплив металургійних агрегатів на навколишнє середовище.

Мета статті

Обумовити ефективність використання термоелектричних перетворювачів для отримання електричного струму за рахунок тепла газів, що відводяться від електродугових печей.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення проблеми в цілому треба розв'язати декілька окремих питань. Перш за все, щоб отримати змінний електричний струм з напругою 220 В від термоелектричних перетворювачів, потрібно виконати ряд кроків, оскільки термоелектричні перетворювачі генерують постійний струм (DC), а для отримання змінного струму (AC) потрібні додаткові пристрої. Нижче наведені ці кроки [10].

1. Підключення термоелектричних перетворювачів.

Термоелектричні перетворювачі генерують постійний струм. Щоб збільшити напругу, можна з'єднати декілька модулів послідовно. Наприклад, якщо один модуль генерує 5 В, то для отримання 220 В потрібно з'єднати близько 44 модулів.

2. Стабілізація напруги. Напруга, яку генерують термоелектричні перетворювачі, може бути нестабільною через зміни температури. Треба використовувати стабілізатори напруги або DC-DC перетворювачі, щоб забезпечити стабільну вихідну напругу.

3. Перетворення постійного струму (DC) у змінний (AC). Для отримання змінного струму 220 В треба використовувати інвертор. Інвертор – це пристрій, який перетворює постійний струм у змінний. Вибір інвертора, який підтримує вихідну напругу 220 В, залежить від необхідної частоти (50 Гц або 60 Гц, залежно від регіону).

4. Підключення навантаження. Після інвертора маємо змінний струм 220 В, який можна використовувати для живлення різних приладів.

Принципова схема перетворення теплової енергії в електричну показана на рисунку 2.

Для оцінки можливого ефекту від використання термоелектричних перетворювачів в контексті, що розглядається, розрахуємо потужність одиничного термоелектричного перетворювача.

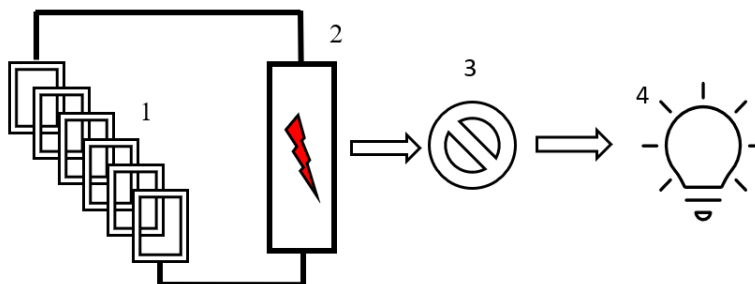


Рис. 2 – Принципова схема перетворення теплової енергії в електричну: 1 – термоелектричні модулі; 2 – стабілізатор напруги; 3 – інвертор; 4 – навантаження

Розрахунки здійснюємо за основними формулами [10], що наведені нижче.

Потужність, що генерується термоелектричним перетворювачем:

$$P = \eta \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де P – потужність (Вт);

η – ККД термоелектричного матеріалу (у частках одиниці);

Q – тепловий потік (Вт);

ΔT – різниця температур між гарячою і холодною сторонами.

Тепловий потік:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \Delta T / d, \quad (3)$$

де λ – теплопровідність матеріалу (Вт/(мК));

A – площа поперечного перерізу термоелектричного елемента (м²);

d – товщина термоелектричного елемента (м).

ККД термоелектричного матеріалу:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}}, \quad (4)$$

де T_h – температура гарячої сторони, К;

T_c – температура холодної боку, К;

ZT – безрозмірний параметр якості термоелектричного матеріалу (залежить від матеріалу).

Виконаємо розрахунок за наступних вихідних даних. Різниця температур: $400 - 300 = 100$ град. Площа, A , термоелектричного перетворювача $0,1 \times 0,1 = 0,01$ м²; його товщину, d , приймаємо рівною $0,01$ м. Вибираємо матеріал, що має величину $\lambda = 2$ Вт/(м·К) і $ZT = 1$.

У цьому випадку

$$\eta = 0,148 \text{ (14,8\%)}$$

Тепловий потік Q за цих умов дорівнює 200 Вт.

У результаті розрахунку отримуємо величину P , що дорівнює 2960 Вт. За наявності площі для установки перетворювачів є можливість з'єднати їх декілька і отримати більшу сумарну потужність.

Наступним етапом є розробка принципової схеми встановлення термоелектричних перетворювачів в існуючу систему газовідбору та газоочистки. Рис. 3 представляє можливий варіант монтажу термоелектричних перетворювачів в систему очистки газів, що відходять від електродугової печі, запропоновану авторами [11]. Як свідчить Рис. 3, на вході вертикальної ділянки допалювання рівномірно за поперечним перерізом розміщені сопла подачі аспіраційних газів. На виході ділянки допалювання стаціонарний газохід обладнаний ділянкою охолодження, послідовно з якою розміщений пиловловлювач. У пристрої на ділянці охолодження рівномірно за поперечним перерізом стаціонарного газоходу можуть бути розміщені форсунки

спрейового випарного охолодження або котел-утилізатор. За даними авторів [11], на виході з описаної системи температура газів зменшується з $\sim 1600^\circ\text{C}$ до $250-400^\circ\text{C}$.

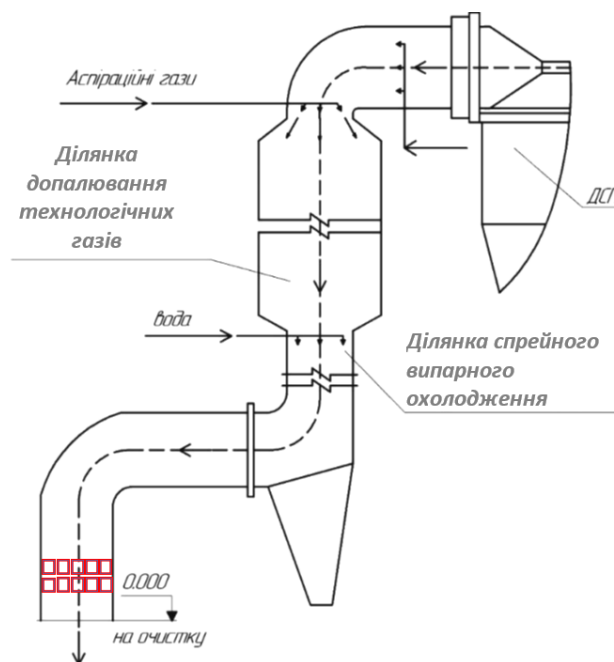


Рис. 3 – Запропонована схема встановлення термоелектричних перетворювачів у систему газоочистки (на підставі [11])

Це робить можливим застосування термоелектричних перетворювачів для генерації електричного струму. Червоним кольором на Рис. 3 показані запропоновані місця можливого встановлення термоелектричних перетворювачів.

Висновки

1. Аналіз літератури та досвід експлуатації електродугових печей свідчить про те, що до 20% теплової енергії, що витрачається на плавку, емітується в навколишнє середовище з газами, які відводяться, а повна утилізація цього тепла на даний час не забезпечується.

2. Перспективним напрямком використання енергії газів, що відводяться з плавильного простору електродугових печей, є застосування термоелектричних перетворювачів, у розрізі чого авторами виконані оціночні розрахунки потужності термоелектричного перетворювача та запропонована схема його встановлення в існуючу систему аспірації.

Перелік використаних джерел

- [1] Сайт ПрАТ «Дніпроспецсталь». URL: <https://www.ua-region/00186536> (дата звернення: 08.02.2025).

- [2] Козлов Г.О., Тополов В.Л. Индукційні печі: Навчальний посібник для студентів ВНЗ. Нікополь : НТ НМетАУ, 2008. 32 с.
- [3] Enhancing the waste heat utilization of industrial park: A heat pump-centric network integration approach for multiple heat sources and users / W. Wu et al. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 306, Article 118306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118306>.
- [4] Литвиненко С.С., Конотопчик І.О. Термоелектричні явища. Ефекти Зеебека та Пельтьє. Актуальні проблеми фундаментальних і прикладних досліджень: матеріали III Міжнародної інтернет-конференції молодих вчених, м. Луцьк, 12-13 квітня 2021 р. С. 61-62.
- [5] d'Angelo M., Galassi C., Lecis N. Thermoelectric Materials and Applications: A Review. *Energies*. 2023. № 16. Article 6409. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176409>.
- [6] Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. *Springer Series in Materials Science*. 2016. Vol. 121. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>.
- [7] Thermal stability and mechanical response of Bi₂Te₃-based materials for thermoelectric applications / Y. Zheng et al. *ACS Applied Energy Materials*. 2020. Vol. 3, no. 3. Pp. 2078-2089. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b02093>.
- [8] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 140. Pp. 167-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>.
- [9] Produkt ERS 200 für Großindustrie und Abwasserunternehmen. URL: <https://www.smarTE5.com/ers200/> (дата звернення: 15.12.2024).
- [10] Ананичук Л.І. Термоелектрика : в 4 т. Чернівці: Букрек, 2003. Том II : Термоелектричні перетворювачі енергії. 376 с.
- [11] Система очищення димових газів електричної печі. URL: <http://uk.xiyeigroup.com/electric-furnace-dedusting-equipment-product/> (дата звернення: 15.12.2024).

ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE ENERGY BALANCE OF MELTING IN ELECTRIC ARC FURNACES

Dan L.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1954-4871 , e-mail: danleonid.alex@gmail.com ;
Trofimova L.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4576-2589 , e-mail: trofimova.pstu@gmail.com ;
Grek K.	student, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro

This paper is devoted to analyzing the possibility of recovering a portion of the electrical energy consumed during metal melting in electric furnaces, specifically, in electric arc furnaces. It is known that metal melting in electric furnaces (especially in electric arc furnaces) produces a significant amount of dust and gases with high temperatures. The output of gases and their composition depends on the composition of the charge, the melting rate of the technological and temperature modes of melting, the oxygen purge mode, etc. Electric arc furnace production is characterized by the content of fine dust in the furnace exhaust gases, which is released most of all during oxygen purging. The other side of the matter is heat emissions into the environment. Global warming requires a quick and effective solution to this problem. The use of heat from the melting space of electric furnaces can, firstly, save energy resources for in-situ technological purposes, and, secondly, provide hot water, steam, and electricity to both external industrial and domestic consumers. One of the most promising methods of utilizing this heat is the use of thermoelectric phenomena, in particular, the Seebeck effect. Equipment based on this effect allows converting thermal energy into electrical energy, and this can be used to improve the energy efficiency of production. This paper analyzes the theoretical basis for the use of thermoelectric converters in general and for the utilization of heat from waste gases from melting furnaces in particular. Based on the best practices, the electrical power of the converter unit is calculated, and a schematic view of the connection of thermoelectric converters to the power grid and their wiring scheme is presented.

Keywords: electric arc furnace, energy balance, Seebeck effect, thermoelectric converter.

References

- [1] Sait PrAT «Dnipropetsstal» (Website of PJSC «Dnipropetsstal»). [Online]. Available: <https://www.ua-region/00186536>. Accessed on: February 8, 2014.
- [2] H.O. Kozlov, and V.L. Topolov, *Induktsiini pechi: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv VNZ* [Induction

- Furnaces: A Study Guide for University Students]. Nikopol, Ukraine: NT NMetAU Publ., 2008. (Ukr.)
- [3] W. Wu et al., «Enhancing the waste heat utilization of industrial park: A heat pump-centric network integration approach for multiple heat sources and users», *Energy Conversion and Management*, vol. 306, article 118306, 2024. doi: **10.1016/j.enconman.2024.118306**.
- [4] S.S. Lytvynenko, and I.O. Konotopchuk, «Termoelektrychni yavyscha. Efekty Zeiebeki ta Peltie» [«Thermoelectric phenomena. Seebeck and Peltier effects»], in Proc. Of the III Int. Internet Conf. «Current problems of fundamental and applied research», Lutsk, Ukraine, 2021, pp. 61-62. (Ukr.)
- [5] M. d'Angelo, C. Galassi, and N. Lecis, «Thermoelectric Materials and Applications: A Review», *Energies*, № 16, article 6409, 2023. doi: **10.3390/en16176409**.
- [6] Goldsmid H. Julian, «Introduction to Thermoelectricity», in *Springer Series in Materials Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, vol. 121, 278 p. doi: **10.1007/978-3-662-49256-7**.
- [7] Y. Zheng, X.Y. Tan, X. Wan, X. Cheng, Z. Liu, and Q. Yan, «Thermal stability and mechanical response of Bi₂Te₃-based materials for thermoelectric applications», *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, no. 3, pp. 2078-2089, 2020. doi: **10.1021/acsaem.9b02093**.
- [8] D. Champier, «Thermoelectric generators: A review of applications», *Energy Conversion and Management*, vol. 140, pp. 167-181, 2017. doi: **10.1016/j.enconman.2017.02.070**.
- [9] Produkt ERS 200 für Großindustrie und Abwasserunternehmen. [Online]. Available: <https://www.smarTE5.com/ers200/>. Accessed on: December 15, 2024. (Ger.)
- [10] L.I. Anatychuk, Termoelektrychni peretvoriuvachi enerhii [Thermoelectric energy converters], in *Termoelektryka* [Thermoelectricity]. Chernivtsi, Ukraine: Bukrek Publ., 2003, vol II, 376 p. (Ukr.)
- [11] Система очищення димових газів електричної печі. [Online]. Available: <http://uk.xiyegroup.com/electric-furnace-dedusting-equipment-product/>. Accessed on: December 15, 2024.
- Стаття надійшла 05.04.2025
Стаття прийнята 08.05.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Дан Л.О., Трофімова Л.О., Грек К.Р. Обґрунтування можливостей покращення енергоефективності процесу плавлення металу в електродугових печах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 134-139. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336320>.

**141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.311

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336322

**ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Якимець С.М.	канд. техн. наук, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5043-3566 , e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;
Ходаковський М.С.	студент, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук;
Олійніченко М.Ю.	аспірант, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6651-0175 , e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua ;
Чорна В.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3641-4152 , e-mail: chornajav@gmail.com

Сучасний світ зіткнувся з подвійною енергетичною кризою: з одного боку, виснажуються запаси викопного палива, з іншого – зростає рівень забруднення навколишнього середовища. У країнах, де основними джерелами енергії залишаються вугілля та нафта, ця проблема особливо гостра, оскільки залежність від традиційних енергоресурсів обмежує економічний розвиток і загрожує екологічній безпеці. Подвійна енергетична криза є серйозним викликом для сучасного світу, але її можна подолати шляхом активного розвитку відновлюваної енергетики. Інвестування у чисті технології, скорочення споживання викопного палива та міжнародне співробітництво у сфері екологічної безпеки допоможуть створити стійку та екологічно чисту енергетичну систему майбутнього. Так, наприклад, металургійні заводи бразильської гірничодобувної компанії Vale S.A., які розташовані в Індонезії, працюють повністю від гідроенергії; гірничорудна транснаціональна корпорація Rio Tinto Group планує інвестувати до 2026 року додаткові 600 мільйонів доларів у будівництво двох сонячних електростанцій потужністю 100 МВт у Пілбарі. Наразі ситуація у гірничо-металургійному комплексі України вкрай складна. Сектор, який до 24 лютого 2022 року забезпечував більшу частину експорту країни, перебуває на межі виживання. З втратою «Азовсталі» та Маріупольського металургійного комбінату імені Ілліча економіка одночасно втратила понад 40% вироблення металу. Через бойові дії знизили виробництво інші металургійні підприємства, працюючи лише на 20%. Періодично призупиняють свою діяльність Ігулецький, Південний та Північний гірничозбагачувальні комбінати (ГЗК) у м. Кривий Ріг, на 47% скоротився видобуток ГЗК групи Ferrexpo, до складу якої входять Полтавський, Біланівський та Єристівський ГЗК [1]. Заблоковані морські порти та введені логістичні обмеження та підвищення на 70% тарифів «Укрзалізниці» на вантажні перевезення погіршили і без того важкий стан підприємств галузі. Разом з видобувною галуззю третій рік під терористичними ударами окупантів перебуває енергетична галузь України. Спеціалісти Світового банку оцінюють втрати країни на суму понад 4,4 трильйони грн. Зруйновано 80% відсотків теплової генерації, майже 100% гідроенергетики, більшість вітрових електростанцій та половина фотовольтаїчних станцій [2]. Мінімальний запас міцності забезпечує атомна енергетика, яка теж зазнала суттєвої втрати – захоплення ядерними терористами найбільшої в Україні та Європі ЗАЕС в Енергодарі. В таких критичних для країни умовах як ніколи гостро стоїть питання подальшого розвитку атомної генерації, розосередження (децентралізація) вироблення електроенергії та забезпечення захисту від руйнації об'єктів енергоінфраструктури. Основними джерелами сировини залізорудної промисловості України є три басейни: Білозерський залізорудний район (Запорізька область); Керченський залізорудний басейн та Криворізький залізорудний басейн. До складу останнього входять не лише ГЗК м. Кривий Ріг, а також ряд ГЗК, розташованих у м. Горішні Плавні (виробляють руду в межах Криворізько-Кременчуцької структурно-металогенної зони). Зважаючи на той факт, що внесок підприємств Білозерського та Керчинського басейнів у загальний видобуток руди складає менше 10%, а також те, що підприємства Кривого Рогу та Горішніх Плавнів працюють, фактично, в межах одного басейну, в представленій роботі загальний аналіз виконано на основі виробничих даних комбінату групи Ferrexpo Poltava Mining. Це дозволить з достатньою достовірністю формалізувати висновки на всі підприємства залізорудної галузі з відкритим способом видобутку руди. У даній роботі на основі проведених розрахунків виконано порівняльний аналіз потенціалу джерел відновлюваної енергетики в умовах ПрАТ «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат». Встановлено, що найбільш перспективним напрямом розбудови розосередженої генерації є вітрові та сонячні електростанції. Зважаючи на особливості

експлуатації, подальший потенціал розвитку рекомендовано акцентувати увагу на побудову саме фотовольтаїчних станцій в розглянутих умовах.

Ключові слова: відновлювана енергетика, сонячні панелі, вітрова електростанція, енергія, потенціал, генерація, залізорудне підприємство.

Постановка проблеми

Затверджені Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та план заходів з його виконання [3] передбачає розвиток генерації альтернативними джерелами на гірничих видобувних підприємствах, для яких аварійні відключення від централізованої мережі електропостачання неприпустимі. Крім того, декарбонізація бізнесу є обов'язковою умовою євроінтеграції, а отже важливим чинником, який стримує доступ видобутої сировини підприємствами галузі на світові ринки. За даними міжнародної компанії McKinsey, яка спеціалізується на вирішенні завдань, пов'язаних з стратегічним управлінням, гірничодобувна промисловість, споживаючи 38% промислової енергії та 15% світової електроенергії, забезпечує від 2-3% світових викидів CO₂ і здатна відіграти значну роль у зменшенні екологічного впливу [4].

Розбудова сучасних систем електропостачання діючих та тимчасово законсервованих залізорудних підприємств потребує реальної оцінки можливостей впровадження автономних міні- та мікроелектростанцій з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання ефективної інтеграції ВДЕ потребує глибокої комплексної оцінки на таких рівнях, як технологія, економіка, суспільство, та не залишилося без уваги наукового світу. Широкий спектр досліджень потенціалу та техніко-економічного обґрунтування систем ВДЕ в гірничому виробництві було представлено у роботах [5-8], в яких подано загальний огляд та багатофакторну оцінку систем з альтернативними джерелами з урахуванням технічних, екологічних та економічних аспектів, описано пошук оптимізованого рішення в багатофакторному просторі. Системам ВДЕ, призначеним для інтеграції або заміни частин традиційних дизельних і газогенераторних установок, а також електромереж в умовах австралійських шахт, було присвячено роботу [9]. Аналіз фотоелектричного потенціалу в умовах відкритих копалин розглянуто у роботах [10-11]. Серед вітчизняних дослідників слід виділити роботи [12-15], присвячені аналізу стану електроенергетики залізорудних підприємств України та підвищенню їх енергоефективності. Найбільш повно дослідження ряду авторів щодо застосування ВДЕ в умовах відкритого видобутку залізорудних копалин систематизовано у роботі [16], в якій розглянуто теоретичні аспекти та практичні рішення щодо підвищення ефективності електропостачання територіально віддалених споживачів шляхом застосування вітрових генеруючих установок в системі електроживлення.

Проведений авторами аналіз підтвердив необхідність комплексної багатофакторної оцінки потенціалу джерел відновлюваної енергетики в зазначених умовах та висвітлення пріоритетів джерел з урахуванням закордонного досвіду.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження технічної можливості використання потенціалу джерел відновлюваної енергетики в системах електропостачання промислових залізорудних підприємств.

Виклад основного матеріалу

Аеродинамічний розрахунок вітроустановки

Як свідчить практика, при оцінці вітрового потенціалу місцевості більшість дослідників розглядає пряму задачу теорії вітроенергетичних установок (ВЕУ), в якій вихідними даними є геометричні розміри ВЕУ, характерні швидкості вітру та ефективність самих складових установок [17, 18]. Обернена задача полягає у визначенні швидкості вітру, який має обдувати вітрокопало визначених розмірів для забезпечення генерування визначеної потужності. При всій універсальності та поширеності застосування в умовах, коли необхідно накласти певні обмеження, застосування цих методів супроводжується рядом складнощів.

Необхідність прийняття обмежень щодо висот опор в умовах розрахунків, приведених авторами у даній статті, зумовлюється, насамперед, особливостями розташування ВЕУ, які плануються інсталиувати на відвалах виробіток з характерною для них щільністю та їх гранулометричним складом. Таким чином, авторами запропоновано комбіновану методику розрахунку, коли ставиться задача визначення кількості вітрових установок зазначеної потужності та їх сумарне вироблення електроенергії в умовах обмеженості висоти опор які можуть бути розміщені на визначеній території.

Розрахуємо параметри однієї вітрової енергетичної установки для метеорологічних умов м. Горішні Плавні, встановленої на висоті 25 м; призначеної для генерування потужності 15000 Вт. При розрахунках враховано коефіцієнт корисної дії електричної частини вітрогенератора $\eta_e = 0,73$.

Під час вибору схеми вітрокопала скористуємось усередненими значеннями розподілу напрямку вітрів за даними багаторічних спостережень [19].

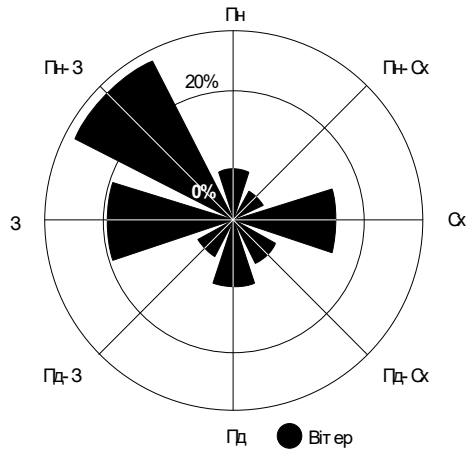


Рис. 1 Діаграма напрямків вітру у м. Горішні Плавні

Відсотковий розподіл напрямів вітрів наведено у табл. 1.

Таблиця 1
Розподіл напрямків вітру у м. Горішні Плавні
за усередненими багаторічними даними

Пн↓	Пн-Сх↙	Сх←	Пд-Сх↘	Пд↑	Пд-З↗	З→	Пн-З↖
7,9 %	5,1 %	16,0 %	7,3 %	10,1 %	6,2 %	19,6 %	27,8 %

Виходячи з даних табл. 1 обрано тип ВЕУ – крильчастий вітроподвигун з системою орієнтації за вітром.

За даними метеорологічних спостережень з урахуванням прогнозованої висоти розміщення ВЕУ, розраховано геометричні розміри вітрового колеса, необхідні для генерування указаної у завданні потужності:

$$N = \zeta \eta_e \frac{\pi D^2 P V^3}{4 R_{нов} T},$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{N R_{нов} T}{\zeta \eta_e \pi P V^3}}; \quad (1)$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{287}{3,14}} \cdot \sqrt{\frac{N T}{\zeta \eta_e P V^3}} = 19,12 \sqrt{\frac{N T}{\zeta \eta_e P V^3}}.$$

Під час розрахунків було враховано співвідношення $P_{ПА} = 133,22 P_{мм.рм.см}$.

Абсолютна температура в останньому виразі розрахована, виходячи із формули:

$$T = t + 273,15. \quad (2)$$

Результати розрахунків мінімальних геометричних розмірів багатолопатевого тихохідного та малоллопатевого тихохідного вітрових коліс наведено у табл. 2.

Розрахунки доводять, що найбільш несприятливим з точки зору вітрових навантажень для указаних географічних умов виявляється липень. Діаметр вітрового малоллопатевого швидкохідного колеса для генерування указаної потужності повинен складати від 9,08 до 9,5 метрів (залежно від обраного конструктиву). У разі використання тихохідного багатолопатевого колеса величина D повинна лежати в межах від 11,24 до 12,31 м.

Для подальших розрахунків прийнято $D_{ш} = 9,5$ м, $D_m = 12,3$ м.

Частота обертання вітрових коліс визначена з використанням виразу:

$$n = \frac{60 V Z}{L} = \frac{60 V Z}{\pi D}, \quad (3)$$

де $L = \pi D$ – довжина окружності, яку описує кінець лопаті, довжиною $\frac{D}{2}$, м.

Результати розрахунків зведено у табл. 3.

Під час розрахунків прийняті наступні параметри: для тихохідних коліс кількість лопатей $m_m \geq 6$, для швидкохідних – $m_{ш} \leq 3$.

Таблиця 2

Розрахунок геометричних розмірів вітрових коліс

№	Місяць	D, м			
		$\xi_{ш} = 0,42$	$\xi_{ш} = 0,46$	$\xi_m = 0,25$	$\xi_m = 0,3$
1	Січень	8,98	8,58	11,64	10,63
2	Лютий	5,8	5,54	7,51	6,86
3	Березень	9,1	8,69	11,78	10,76
4	Квітень	6,03	5,76	7,82	7,14
5	Травень	9,39	8,98	12,17	11,11
6	Червень	9,46	9,04	12,26	11,19
7	Липень	9,5	9,08	12,31	11,24
8	Серпень	9,48	9,06	12,28	11,21
9	Вересень	9,36	8,95	12,13	11,08
10	Жовтень	9,23	8,82	11,96	10,92
11	Листопад	9,15	8,74	11,86	10,82
12	Грудень	9,05	8,65	11,73	10,71

Таблиця 3

Розрахунок частот обертання вітрових коліс

№	Місяць	n, об/хв				
		$Z_{m=1}^u = 9,0$	$Z_{m=2}^u = 7,0$	$Z_{m=3}^u = 5,0$	$Z_{m=6}^m = 3,0$	$Z_{m=12}^m = 1,2$
1	січень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
2	лютий	82,2	63,93	45,67	21,17	8,47
3	березень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
4	квітень	82,2	63,93	45,67	21,17	8,47
5	травень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
6	червень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
7	липень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
8	серпень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
9	вересень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
10	жовтень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
11	листопад	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
12	грудень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35

Для подальших розрахунків обрано мінімальні з розрахованих частот:

$$n_{m=1}^u = 61,65 \text{ об/хв}; n_{m=2}^u = 47,95 \text{ об/хв};$$

$$n_{m=3}^u = 34,25 \text{ об/хв}; n_{m=6}^m = 15,88 \text{ об/хв};$$

$$n_{m=12}^m = 6,35 \text{ об/хв}.$$

Кутова швидкість обертання визначається з виразу:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}. \quad (4)$$

Результати розрахунку наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Розрахунок кутової швидкості обертання ω , с^{-1}

$\omega_{m=1}^u$, с^{-1}	$\omega_{m=2}^u$, с^{-1}	$\omega_{m=3}^u$, с^{-1}	$\omega_{m=6}^m$, с^{-1}	$\omega_{m=12}^m$, с^{-1}
6,45	5,02	3,58	1,67	0,66

Розрахунок відцентрової сили $F_{\text{вц}}$ кожного вітрового колеса проводиться за виразом [6]:

$$F_{\text{вц}} = m\omega^2 R = \frac{m\omega^2 D}{2}. \quad (5)$$

Результати розрахунку наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Розрахунок відцентрової сили вітроколів $F_{\text{вц}}$

$F_{\text{вц } m=1}^u$, Н	$F_{\text{вц } m=2}^u$, Н	$F_{\text{вц } m=3}^u$, Н	$F_{\text{вц } m=6}^m$, Н	$F_{\text{вц } m=12}^m$, Н
197,98	239,53	183,31	102,02	33,62

Стартовий обертовий момент $M_{\text{см}}$ вітрових коліс може бути оцінений за наближеною формулою:

$$M = \frac{V^2 R^3}{Z^2} = \frac{V^2 D^3}{8Z^2}. \quad (6)$$

Результати розрахунку наведено у табл. 6.

Таблиця 6

Розрахунок стартового обертового моменту $M_{\text{см}}$

$M_{\text{см } m=1}$, Н·м	$M_{\text{см } m=2}$, Н·м	$M_{\text{см } m=3}$, Н·м	$M_{\text{см } m=6}$, Н·м	$M_{\text{см } m=12}$, Н·м
15,43947	25,52238	50,02387	13,80662	86,29138

За умовою мінімізації відцентрової сили та забезпечення високого стартового моменту та практики застосування обираємо вітрове колесо з трьома лопатями.

За каталожними даними [20, 21] з урахуванням діаметру вітрового колеса попередньо обрано ВЕУ EuroWind 15 з характеристиками: номінальна потужність $P = 15 \text{ кВт}$; діаметр ротора $D = 11 \text{ м}$; кількість лопатей $m = 3$; напруга генератора $U_g = 380 \text{ В}$; напруга інвертора $U_i = 380 \text{ В}$; швидкість обертання ротора $\omega = 20,93 \text{ с}^{-1}$.

Отримана оцінка потужності є мінімальною, зважаючи на нехтування місцем розташування вітрової установки. Вона може бути використана в подальших розрахунках після уточнення всіх необхідних даних.

Оцінюємо потенційну встановлену потужність ВЕС в умовах рудовидобувних підприємств, беручи за основу основний чинник – місце розташування вітрових станцій. Найбільш раціональним бачиться розміщення вітряків на відвалах кар'єрів. В першу чергу, перспектива полягає у можливості збільшення баричних перепадів завдяки висоті піднесення насипів пустої руди. Так, в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК» (ПГЗК) ця висота складає до 130 метрів, що дасть суттєву «прибавку» до середньостатистичних швидкостей вітру. Крім того, оцінка площ східного та західного відвалів ПГЗК дає значення 5200 тис. м^2 та 7166 тис. м^2 відповідно. Зважаючи на той факт, що відвали є робочими, оцінка раціональної площі повинна бути знижена удвічі.

На рис. 2 наведено схематичне розташування відвалів відносно основного кар'єру.

Беручи за основу оцінку площ відвалів, розраховується потенційна кількість вітроустановок, які можна встановити. Зважаючи на повторюваність переважаючих напрямів вітрів у регіоні, раціонально розмістити ВЕУ рядами, які будуть перпендикулярні до переважаючих напрямів вітрів.

Згідно з рекомендаціями [22], мінімальна відстань між сусідніми вітроустановками повинна складати не менше трьох висот ВЕУ. Складену розрахункову схему розміщення установок для прийнятих в роботі умов показано на рис. 3.

Виходячи з цієї схеми, для побудови чотирьох вітряків необхідно зайняти площу:

$$S_{4BEU} = 100 \cdot 100 = 10000 \text{ м}^2.$$

Виходячи з оціненої загальної площі відвалів визначається кількість квадратних вітряків, які теоретично можна розмістити в умовах ПГЗК:

$$n_{4BEU}^{cx} = \frac{S_{роб}^{cx}}{S_{4BEU}} = \frac{0,5 \cdot 5200 \cdot 10^3}{10000} \approx 260 \text{ од.} \quad (7)$$

$$n_{4BEU}^{зах} = \frac{S_{роб}^{зах}}{S_{4BEU}} = \frac{0,5 \cdot 7166 \cdot 10^3}{10000} \approx 358 \text{ од.} \quad (8)$$



Рис. 2 – Схема розташування відвалів ПГЗК

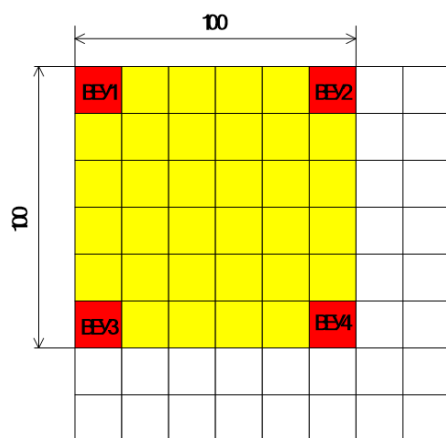


Рис. 3 – Схема розташування ВЕУ

Таким чином, загальна кількість вітряків, які теоретично можуть бути розміщені на відвалах, складає:

$$n_{BEU} = 4 \cdot (260 + 358) = 2472 \text{ од.}$$

Реалізувати на практиці розрахункову схему достатньо проблематично в силу неправильності геометрії відвалів, тому для реалістичної оцінки прийнято кількість вітроустановок, зменшену на третину. Таким чином, розрахована потенційна кількість вітроустановок, яка може бути встановлена у вказаних умовах, складає $n_{BEU} = 1648$ од.

Зважаючи на попередні розрахунки, сумарна теоретична встановлена потужність ВЕС складатиме:

$$T_{BEC} = 1648 \cdot 15000 = 25,72 \text{ МВт.}$$

Розрахунок фотовольтаїчної станції (ФЕС)

Для проведення розрахунків характеристик ФЕС, яку планується встановити в умовах ПГЗК, в якості основного модуля обрано модуль Risen RSM144-6-380M [23]. Задаючись проєктною встановленою потужністю генерації $P_{пр}^{FEC} \geq 20000$ кВт, враховуючи паспортну потужність одного модуля $P_{мод} = 380$ Вт, визначається кількість модулів, необхідних для забезпечення встановленої потужності ФЕС:

$$n_{fm} \geq \frac{20 \cdot 10^6}{380} \geq 52632 \text{ од.}$$

У єдиний сонячний масив сонячні панелі приєднані послідовно. Для перетворення енергії фотовольтаїчних модулів передбачено використання стрінгових інверторів SUN2000-100KTL-H1 з підключенням за схемою 47 інверторів по 31 стрінг з 28 PV модулів; 21 інвертор по 21 стрінг з 28 PV модулів. Зважаючи на зазначене, прийнято кількості модулів $n_{fm} = 53144$ од.

Для оцінювання потужності проєктованої ФЕС розраховується обсяг виробленої електроенергії однією сонячною батареєю. У попередніх розрахунках враховано, що виходячи з умов розміщення модулів, кут нахилу майданчика до горизонту $\beta = 45^\circ$, азимут щодо півдня для наведених у географічних умов $\alpha_{ПП} = -25^\circ$.

ВАХ модуля Risen RSM144-6-380M, приведену на рис. 4, розділено на кілька точок, включаючи точки неробочого ходу та короткого замикання. Зважаючи на мапу глобального опромінення та місце розташування (м. Горішні Плавні), розрахунки проведено для кривої $R = 1000$ Вт/м².

Для кожної точки значення струму визначено відповідне значення напруги. За цими даними визначено ряд потужностей $P_{ВАХ}$ сонячного модуля як добуток струму на напругу, результати занесено у табл. 7.

За технічними характеристиками Risen RSM144-6-380M, прийнявши $k_{зан} = 0,97$, що є типовим для квадратних сонячних елементів, визначено площу

сонячного модуля:

$$F_{\Phi M} = nk_{зан} F_{CE}, \quad (9)$$

де $n = 72$ – кількість сонячних елементів у фотovoltaїчному модулі.

$$F_{\Phi M} = 72 \cdot 0,97 \cdot 0,156^2 \approx 1,7 \text{ м}^2.$$

Risen RSM144-6-380M

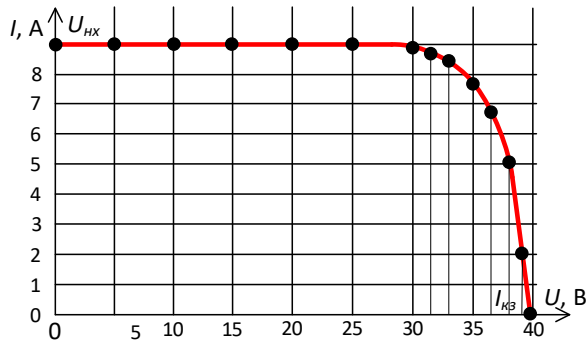


Рис. 4 – ВАХ модуля Risen RSM144-6-380M для 1000 Вт/м²

Розраховане значення заносено у таблицю 7.

Зважаючи на розраховану площу відвалів, оцінюється можливість встановлення фотovoltaїчних модулів на відвалах.

За прийнятої кількості фотопанелей $n_{\Phi n} = 53144$ та розрахованої площі одного модуля $F_{\Phi M} = 1,7 \text{ м}^2$ загальна площа фотovoltaїчного поля складатиме:

$$S_{CEC} = 53144 \cdot 1,7 \approx 90345 \text{ м}^2.$$

Враховуючи, що загальна робоча площа відвалів:

$$S_{роб} = S_{роб}^{cx} + S_{роб}^{zax} = 0,5 \cdot (5200 + 7166) \cdot 10^3 = 6183000 \text{ м}^2,$$

визначено відсоток площі, необхідний для розміщення зазначеної кількості фотопанелей:

$$\frac{S_{CEC}}{S_{роб}} \cdot 100\% = \frac{90345}{6183000} \cdot 100\% \approx 14\%.$$

Корисна потужність визначається, використовуючи співвідношення $P_{кор} = RF_{\Phi M}$ за умови прийнятого раніше значення $R = 1000 \text{ Вт/м}^2$:

$$P_{кор} = 1000 \cdot 1,7 = 1700 \text{ Вт}.$$

За формулою $\eta_{\Phi M} = \frac{P_{BAX}}{P_{кор}} \cdot 100$, у якій P_{BAX} –

потужність, яку визначають за ВАХ визначеного сонячного модуля; $P_{кор} = RF_{\Phi M}$ – корисна потужність, яку визначають залежно від рівня освітленості R і площі фотovoltaїчного модуля $F_{\Phi M}$, визначено ряд ККД модуля, який занесено у табл. 7.

За даними табл. 7 побудована залежність $\eta_{\Phi M} = f(P_{BAX})$ та визначено максимальне значення ККД $\eta_{\Phi M \max} = 16,5\%$ за відповідного значення потужності $P_{BAX} = 280,5 \text{ Вт}$ (рис. 5). Визначене значення максимального ККД у відносних одиницях використано у табл. 8 для подальших розрахунків.

Таблиця 7

Результати розрахунку основних енергетичних характеристик фотovoltaїчного модуля Risen RSM144-6-380M

Параметр	Значення											
$U, \text{В}$	$U_{нх}$	5	15	20	30	31,5	33	35	36,5	38	39	39,5
$I, \text{А}$	9	9	9	9	9	8,75	8,5	7,8	6,75	5	2	$I_{кз}$
$P_{BAX}, \text{Вт}$	0	45	135	180	270	275,6	280,5	273	246,4	190	78	0
$\eta_{\Phi M}, \%$	0	2,6	7,9	10,6	15,9	16,2	16,5	16	14,5	11,1	4,5	0

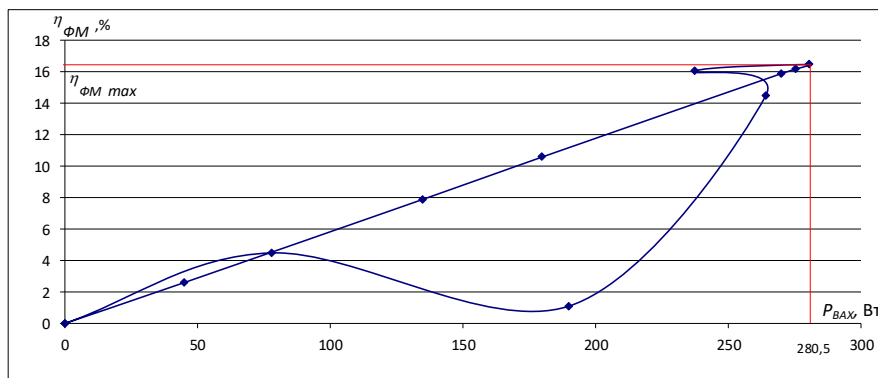


Рис. 5 – Залежність $\eta_{\Phi M} = f(P_{BAX})$

За довідниковими даними [24] визначається величина валового денного щомісячного надходження сонячної радіації для м. Горішні Плавні та зазначених кутів нахилу панелі до горизонту β та азимут $\alpha_{ПП}$.

Визначивши за паспортними даними Risen RSM144-6-380M температурний коефіцієнт зміни потужності $k_{Pmax} = -0,004$ в.о., визначається коефіцієнт, використовуючи довідникові дані [25] щодо середньомісячної температури повітря у м. Горішні Плавні:

$$k_t = 1 - k_{Pmax} (T - T_0), \quad (10)$$

де T – температура довкілля для заданого місяця, °C; $T_0 = 25^\circ\text{C}$ – стандартна температура сонячного елемента.

Далі визначається денна генерація електричної енергії фотомодулем у відповідний місяць:

$$E_i = E'_{вал} k_\beta F_{\Phi M} m \eta_{\Phi M} k_t \eta_{\Delta P}^m \eta_{\Delta E}^m, \quad (11)$$

де $E'_{вал}$ – валовий денний прихід сонячної радіації на аналізований майданчик, кВт·год/м²/день; k_β – коефіцієнт перерахунку сумарного потоку сонячної енергії з горизонтальної площини на похилу поверхню сонячних панелей залежно від орієнтації відносно

півдня; m – кількість модулів у сонячній батареї, шт; $\eta_{\Phi M}$ – максимальний з визначених ККД, %; k_t – коефіцієнт, який враховує вплив температури сонячного модуля на його ККД; $\eta_{\Delta P}^m$, $\eta_{\Delta E}^m$ – відповідні втрати потужності, які зумовлені послідовним з'єднанням елементів та передачею енергії до споживача.

Результати розрахунків занесено до табл. 8.

На наступному етапі визначається вироблення електроенергії в заданий період з урахуванням календарної кількості днів у кожному місяці та загальної кількості панелей, використовуючи формулу:

$$E_{\Phi B} = n_{\Phi n} \sum_{i=1}^m n_i E_i, \quad (12)$$

в якій i – кількість місяців, для яких виконують розрахунок; n_i – кількість календарних днів у поточному місяці; E_i – розраховане денне вироблення електричної енергії для поточного місяця; $n_{\Phi n} = 53144$ – загальна кількість фотопанелей, прийнята на початку розрахунку. Результати розрахунків наведено у табл. 9.

Таблиця 8

Розрахунок денного вироблення електричної енергії в фотovoltaїчній батареї E_i , кВт·год

Місяць	$E'_{вал}$, кВт год/м ² /день	k_β , в.о	$F_{\Phi M}$, м ²	m , шт	$\eta_{\Phi M}$, в.о.	k_t , в.о.	$\eta_{\Delta P}^m$, в.о.	$\eta_{\Delta E}^m$, в.о.	E_i , кВт·год
Січ.	1,19	1,11	1,7	1	0,165	1,12	0,97	0,9	0,362
Лют.	1,93	1,11	1,7	1	0,165	1,11	0,97	0,9	0,582
Бер.	2,84	1,11	1,7	1	0,165	1,09	0,97	0,9	0,841
Квіт.	3,68	1,11	1,7	1	0,165	1,07	0,97	0,9	1,07
Трав.	4,54	1,11	1,7	1	0,165	1,05	0,97	0,9	1,295
Черв.	4,75	1,11	1,7	1	0,165	1,03	0,97	0,9	1,33
Лип.	4,76	1,11	1,7	1	0,165	1,03	0,97	0,9	1,33
Серп.	4,40	1,11	1,7	1	0,165	1,03	0,97	0,9	1,23
Вер.	3,06	1,11	1,7	1	0,165	1,05	0,97	0,9	0,873
Жовт.	2,00	1,11	1,7	1	0,165	1,07	0,97	0,9	0,582
Лист.	1,20	1,11	1,7	1	0,165	1,09	0,97	0,9	0,355
Груд.	0,94	1,11	1,7	1	0,165	1,10	0,97	0,9	0,281

Таблиця 9

Розрахунок генерації енергії ФЕС

Місяць	n_i , днів	E_i , кВт·год	$n_i E_i$, кВт·год	Місяць	n_i , днів	E_i , кВт·год	$n_i E_i$, кВт·год
Січ.	31	0,362	11,222	Лип.	31	1,33	41,23
Лют.	28	0,582	16,296	Серп.	31	1,23	38,13
Бер.	31	0,841	26,071	Вер.	30	0,873	26,19
Квіт.	30	1,07	32,1	Жовт.	31	0,582	1,746
Трав.	31	1,295	40,145	Лист.	30	0,355	10,62
Черв.	30	1,33	39,9	Груд.	31	0,281	8,711

Враховуючи дані таблиці, визначено річну генерацію енергії СЕС:

$$E_{\Phi B} = 7719467,5 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Побудувавши графік річного вироблення електроенергії (рис. 6), можна визначити, що мінімальне вироблення електроенергії спостерігається у грудні, а максимальне характерне для липня.

Розрахунок генерації електроенергії з використанням мікроГЕС

Для оцінювання потенціалу використання гідроенергетики виконано аналіз роботи водовідливу, заживленого від ПС-35 «Шахта».

Зважаючи на графік роботи устаткування, приведений у табл. 10, побудовано добовий графік споживання, показаний на рис. 7.

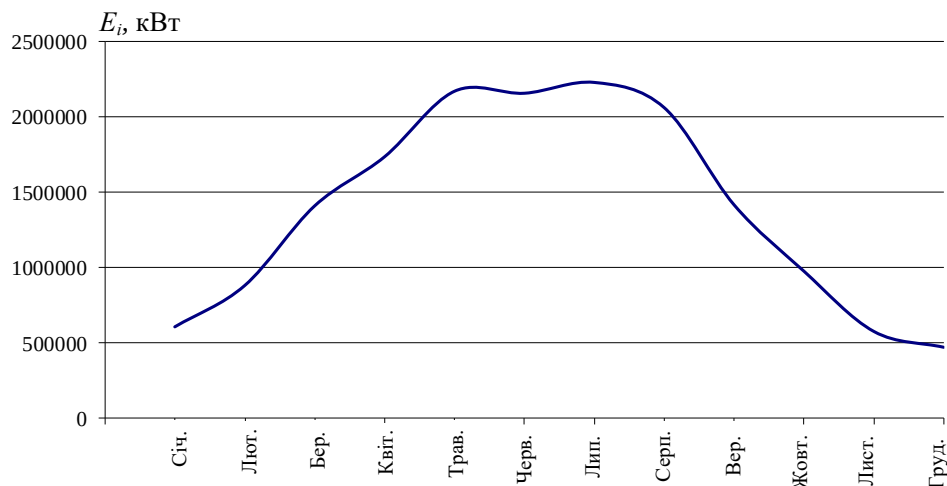


Рис. 6 – Графік річної генерації електроенергії сонячною електростанцією

Таблиця 10

Графік роботи устаткування підстанції «Шахта»

Час доби	S, кВт								
	насос 1	насос 2	насос 3	насос 4	насос 5	насос 6	насос 7	насос 8	насос 9
6:00-11:00	500	500	500	0	0	0	0	500	0
11:00-20:00	500	500	500	500	500	500	500	500	500
20:00-23:00	0	0	0	500	500	500	0	0	500
23:00-06:00	500	500	500	500	500	500	500	500	500

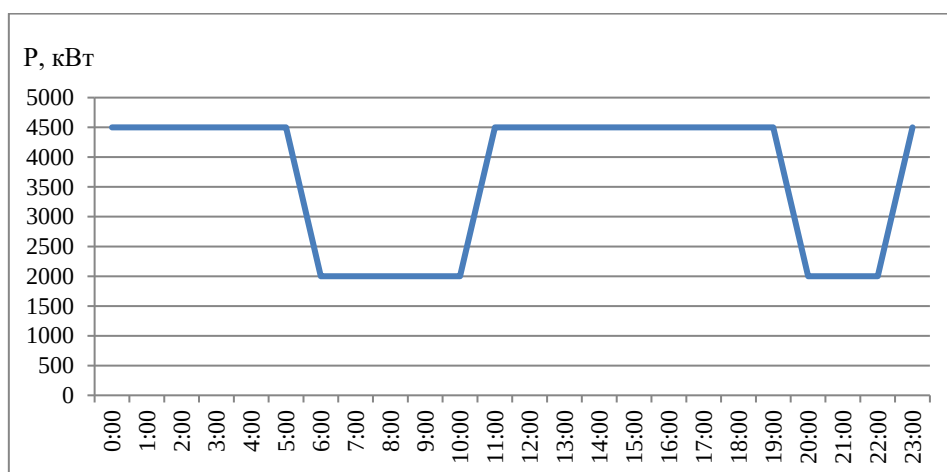


Рис. 7 – Добовий графік споживання електроенергії підстанції «Шахта»

Таблиця 11

Графік роботи при відкачуванні води з кар'єру

Час	Q, м³								
	насос 1	насос 2	насос 3	насос 4	насос 5	насос 6	насос 7	насос 8	насос 9
6:00-8:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300
8:00-10:00	300	0	300	300	0	300	0	0	0
10:00-17:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300
17:00-21:00	0	300	0	0	300	0	0	300	300
21:00-23:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300
23:00-6:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300

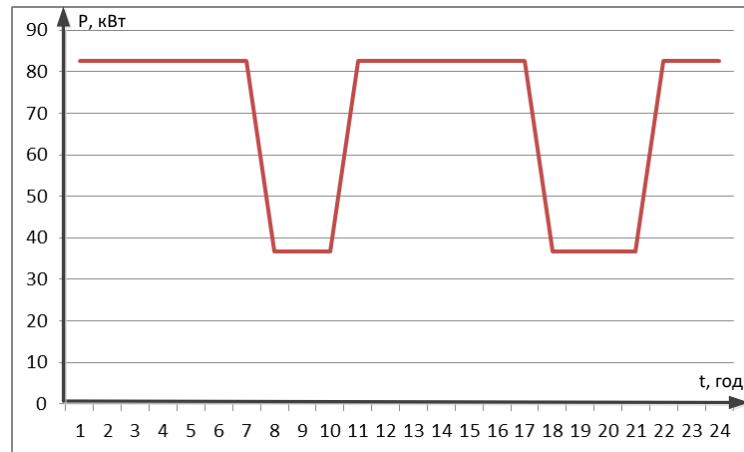


Рис. 8 – Генерація електроенергії при використанні мікро-ГЕС, на виході труби відкачування

У табл. 11 приведено графік обсягів води, що перекачує насосне обладнання при відкачуванні води з кар'єру.

За даним графіком можна визначити сумарні витрати води як добуток наведених витрат на час роботи двигуна.

Враховуючи результати аналізу системи водовідведення, проведені на підприємстві за визначеними витратами води $Q_m = 300$ м³/с та тиском $H=10$ м, оберемо гідротурбіну Power Spout T-80 [26].

Потужність потоку води на валу гідротурбіни N_m визначають з виразу [27]:

$$N_m = k \rho g Q_m H \eta_m, \quad (13)$$

де k – коефіцієнт утрат тиску у відкритому гідроканалі; ρ – густина води, кг/м³ (для холодної прісної води $\rho \approx 1250$ кг/м³), $g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, м/с²; Q_m – витрати води через гідротурбіну, м³/с; H – натиск нетто турбіни, м; η_m – коефіцієнт корисної дії турбіни (для сучасних гідротурбін великої потужності $\eta_m = 0,93 \dots 0,96$, для малих ГЕС $\eta_m = 0,5$).

Враховуючи паспортні дані турбіни, визначається потужність на валу гідротурбіни, яка виробляється потоком води за годину:

$$N_m = \frac{1 \cdot 1250 \cdot 9,8 \cdot 2700 \cdot 10 \cdot 0,9}{3600} \approx 85,23 \text{ кВт.}$$

Під час розрахунків потужності враховано переведення витрат з м³/с в м³/год за формулою:

$$Q_m^{m^3/год} = 3600 Q_m^{m^3/c}. \quad (14)$$

Коефіцієнт втрат тиску у відкритому гідроканалі прийнятий $k = 1$, зважаючи на незмінність величини натиску.

Електрична потужність гідрогенератора N_e визначається з урахуванням $\eta_e = 0,97$:

$$N_e = N_m \eta_e = 85,23 \cdot 0,97 \approx 82,68 \text{ кВт.} \quad (15)$$

Відповідно до графіка витрати води побудовано графік генерації електроенергії при використанні мікро-ГЕС, на виході труби відкачування (хвостосховище), рис. 8.

Обсяг генерації електроенергії ГЕС $E_{ГЕС}$ визначається за період часу 1 рік, зважаючи на незмінність величини натиску та заданий період використання $T_{вик} = 2200$ год:

$$E_{ГЕС} = \int_0^T N_{ГЕС_{i\Sigma}} dt = 1 \cdot T_{вик} \cdot N_{ГЕС_{i\Sigma}} = 82,68 \cdot 10^3 \cdot 2200 = 181,896 \text{ МВт} \cdot \text{год.} \quad (16)$$

Розрахунок параметрів мікро-ГАЕС

Розрахунок довжини греблі L , необхідної для забезпечення роботи гідроаккумуляційної електростанції, проводиться за формулою [27]:

$$L = \frac{H}{i} \cdot 10^3, \quad (17)$$

де H – натиск води, м; i – ухил водогонів, м/км.

$$L = \frac{10}{0,6} \cdot 10^3 \approx 16700 \text{ м.}$$

Площа водойми (дзеркала води) F_g визначається, використовуючи вираз, в якому $l_{бер} = 0,01L$:

$$F_g = 0,5Ll_{бер}. \quad (18)$$

$$F_g = 0,5 \cdot 16700 \cdot 0,01 \cdot 16700 = 1,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2.$$

Запас води G_g , необхідний для нормальної роботи гідротурбін, визначається згідно виразу:

$$G_g = 0,5F_gH = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 10^6 \cdot 10 \approx 7 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Збільшення висоти греблі $h_{зан}$, необхідне для запобігання нестачі води (додаткового запасу):

$$h_{зан} = \frac{G_g}{F_g} = \frac{7 \cdot 10^6}{1,4 \cdot 10^6} = 5 \text{ м.}$$

Загальна висота греблі з урахуванням запасу:

$$H_{ер} = H + h_{зан} = 10 + 5 = 15 \text{ м.}$$

Потужність греблі ГАЕС, зумовлена потенційною енергією води:

$$P_{ер} = 9,81QH_{ер} = 9,81 \cdot 2,7 \cdot 15 \approx 398 \text{ кВт.}$$

З урахуванням втрат $\eta_m = 0,65$ потужність гідротурбіни ГАЕС складає:

$$P_m = 398 \cdot 0,97 \approx 386 \text{ кВт.}$$

Порівняння потенційних джерел розосередженої генерації та визначення напрямку проектування

Таким чином, у результаті виконаних розрахунків отримано потенційні осяги вироблення електроенергії в умовах ПГЗК, які систематизовано у табл. 12.

Таблиця 12

Прогнозовані обсяги вироблення електроенергії

Тип електростанції	Потужність, кВт
Вітрова електростанція	25720
Сонячна електростанція (СЕС)	20000
Мікро-ГЕС	82,68
Мікро-ГАЕС	396

Як видно з таблиці, найбільш перспективними з розглянутих альтернативних джерел є вітрова та сонячна електростанції.

Порівнюючи ці два основних джерела розосередженої генерації в умовах залізничних підприємств, можна відміти їх переваги і недоліки.

До загальних переваг побудови ВЕС можна віднести більш рівномірний графік добового

навантаження та значно вищий коефіцієнт використання встановленої потужності. В той же час, для СЕС характерні більш швидкі терміни будівництва та окупності. Це пояснюється значно вищими вітровими навантаженнями, яких зазнають мачти вітрових установок при експлуатації, та, відповідно, значно більшими витратам при спорудженні їх фундаментів.

Найбільш раціональним місцем встановлення ВЕС та СЕС є відвали розкривних гірських порід. Дослідження сучасного стану відвалів Інгулецького гірничозбагачувального комбінату (який, як і ПГЗК, розробляє поклади Криворізького залізрудного басейну) дають інформацію про їх мінералогічний склад: переважно пухкі кайнозойські породи, некондиційні та окислені кварцити [28]. Зважаючи на те, що обидва підприємства працюють в межах одного залізрудного басейну, склад відвалів Полтавського ГЗК очікується схожим. Зважаючи на сказане, а також враховуючи, що значну частку відвалів складають відходи сухої магнітної сепарації, можна зазначити, що згідно з [22] виникає необхідність побудови підсиленних фундаментів. Це значно підвищить і без того високі, порівняно з СЕС капіталовкладення. При цьому, за розрахунками, буде використано всю можливу потенційну робочу площу.

Висновки

Проведені дослідження показують, що для побудови СЕС з встановленою потужністю на 22% меншою за потужність вітрової станції, буде задіяно лише 14% відсотків робочих площ. Зважаючи на подальший потенціал розвитку та прогнозовано менші капіталовкладення за рахунок відсутності необхідності проведення pracеvміcтких робіт з укріплення фундаментів, при розбудові систем електропостачання з використанням ВДЕ вибір робити слід на користь СЕС. Спорудження гідроспоруд, не потребує значних капіталовкладень: турбіни мікро-ГЕС встановлюють в місцях витоку відкачуваних вод, дамба ГАЕС може бути сформована в процесі поточного складування відходів, проте рівні їх генерації порівняно незначні.

Перелік використаних джерел

- [1] На межі існування: як війна змінює український промисловий сектор. URL: <https://www.unian.ua/economics/other/viyna-proti-rosiji-yak-viyna-zminyuye-ukrajinskiy-promisloviy-sektor-ostanni-novini-11928213.html> (дата звернення: 15.11.2024).
- [2] Енергетика України у червні 2024 р. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf> (дата звернення: 04.11.2024).
- [3] Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : Розпорядження Кабінету міністрів України від 13 серпня 2024 р.

- №761-p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 15.12.2024).
- [4] Creating the zero-carbon mine / Legge H., Müller-Falcke C., Nauc'ler T., Ostgren E. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine> (дата звернення: 17.01.2025).
- [5] Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches / T. Igogo et al. *Applied Energy*. 2021. Vol. 300. Article 117375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.
- [6] Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential / McLellan B.C., Corder G.D., Giurco D.P., Ishihara K.N. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 32. Pp. 32-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.016>.
- [7] Abbaspour H., Abbaspour F. Renewable energy systems in the mining industry: a literature review and research agenda. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2022. Vol. 12. Pp. 569-580. DOI: <http://dx.doi.org/10.20508/ijrer.v12i1.12828.g8438>.
- [8] Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges / X. Li et al. *Energy Strategy Reviews*. 2024. Vol. 56. Article 101597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101597>.
- [9] Strazzabosco A., Gruenhagen J.H., Cox S. A review of renewable energy practices in the Australian mining industry. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 187. Pp. 135-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.021>.
- [10] Choi Y., Song J. Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: a case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned sangdong mine, Korea. *Sustainability*. 2016. Vol. 8. Article 1320. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8121320>.
- [11] Baig M.H., Surovtseva D., Halawa E. The potential of concentrated solar power for remote mine sites in the northern territory, Australia. *Journal of Solar Energy*. 2015. Article 617356. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/617356>.
- [12] Сінчук І.О. Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2018. 166 с.
- [13] Сінчук О.М., Сінчук І.О., Дозоренко О.В. Діагностика та прогнозування рівнів електроспоживання залізрудних копалин. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2019. Том. 24, №2(109). С. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731>.
- [14] Півняк Г.Г., Білий М.М., Бажін Г.М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2008. 550 с.
- [15] Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines / O. Sinchuk et al. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Vol. 15 (4). Pp. 25-33. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>.
- [16] Дозоренко О.В. Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничозбагачувальних комбінатів: дис. ... д-ра філософії : 141. Кривий Ріг, 2022. 244 с.
- [17] Основи вітроенергетики : підручник / Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Нойбергер Н., Ципленков Д.В. Дніпропетровськ : НГУ, 2015. 335 с.
- [18] Головкин В.М. Вітроенергетика : навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 88 с.
- [19] Погода Кременчук. URL: <https://meteopost.com/city/19860/ua/> (дата звернення: 10.01.2025).
- [20] Українські енергетичні системи. URL: <https://enersun.com.ua/ua/vetrogenerator/> (дата звернення: 15.01.2025).
- [21] Eurowind Energy [Online]. Available: <https://eurowindenergy.com/our-projects> (дата звернення: 15.12.2024).
- [22] ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій. [Чинний від 2000-08-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство палива та енергетики України, 2000. 50 с.
- [23] Risen Solar technology. URL: https://storage.ua.prom.st/1328014_risen_375_mhpc.pdf (дата звернення: 01.11.2024).
- [24] Риндюк Д.В., Шелешей Т.В., Беднарська І.С. Нетрадиційні джерела енергії. Практичні заняття : навч. посіб. для студ. першого рівня вищої освіти (бакалавр) спеціальності 144 «Теплоенергетика». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 81 с.
- [25] ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-11-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2011. 83 с.
- [26] Powerspout TRG – Turgo turbine. URL: <https://www.esolar.co.nz/products-1/powerspout-hydro-trg> (дата звернення: 01.11.2024).
- [27] Зима Т.І., Хлапук М.М. Гідротехнічні споруди: інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. Рівне : НУВГП, 2009. 210 с.
- [28] Губіна В.Г. Сучасний стан відвалів Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату. *Геохімія техногенезу*. 2023. Вип. 9. С. 43-49. DOI: <https://doi.org/10.32782/geotech2023.37.07>.

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF RENEWABLE ENERGY SOURCES
IN THE CONDITIONS OF IRON-MINING ENTERPRISES

Yakymets S.M.	PhD (Engineering), Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5043-3566 , e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;
Khodakovskiy M.S.	student, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk;
Oliynichenko M.Yu.	postgraduate student, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6651-0175 , e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua ;
Chorna V.O.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3641-4152 , e-mail: chornajav@gmail.com

The modern world is facing a double energy crisis: on the one hand, fossil fuel reserves are being depleted, and on the other hand, the level of environmental pollution is growing. In countries where coal and oil remain the main sources of energy, this problem is particularly acute, as dependence on traditional energy resources limits economic development and threatens environmental safety. The dual energy crisis is a serious challenge for the modern world, but it can be overcome through the active development of renewable energy. Investing in clean technologies, reducing fossil fuel consumption, and international cooperation in environmental security will help create a sustainable and environmentally friendly energy system of the future. For example, the metallurgical plants of the Brazilian mining company Vale S.A. located in Indonesia are fully powered by hydropower; the mining multinational Rio Tinto Group plans to invest an additional \$600 million in the construction of two 100 MW solar power plants in Pilbara by 2026. The situation in Ukraine's mining and metals sector is currently extremely difficult. The sector, which until February 24, 2022 accounted for the majority of the country's exports, is on the brink of survival. With the loss of Azovstal and Ilyich Iron and Steel Works of Mariupol, the economy simultaneously lost more than 40% of its metal production. Other metallurgical enterprises reduced production due to the fighting, operating at only 20%. Inhulets, Pivdennyi and Pivdennyi mining and processing plants (MPPs) in Kryvyi Rih periodically suspend their operations, and production of MPPs of the Ferrexpo group, which includes Poltava, Bilanivske and Yeristovo MPPs, decreased by 47% [1]. Blocked seaports, logistical restrictions, and a 70% increase in Ukrzaliznytsia's freight tariffs have worsened the already difficult situation of the industry. Along with the extractive industry, the energy sector of Ukraine has been under terrorist attacks for three years. World Bank experts estimate the country's losses at over UAH 4.4 trillion. 80% of thermal generation, almost 100% of hydropower, most wind power plants, and half of photovoltaic power plants have been destroyed [2]. The minimum safety margin is provided by the nuclear power industry, which also suffered a significant loss - the seizure of the largest nuclear power plant in Ukraine and Europe, the Enerhodar NPP, by nuclear terrorists. In such critical conditions for the country, the issue of further development of nuclear generation, dispersal (decentralization) of electricity generation and protection against destruction of energy infrastructure facilities is more acute than ever. The main sources of raw materials for the Ukrainian iron ore industry are three basins: Bilozersky Iron Ore District (Zaporizhzhia region); Kerch Iron Ore Basin; and Kryvyi Rih Iron Ore Basin. The latter includes not only the iron ore mines of Kryvyi Rih. Kryvyi Rih, as well as a number of GOKs located in Horishni Plavni (producing ore within the Kryvyi Rih-Kremenchuk structural and metallogenic zone). Taking into account the fact that the contribution of the enterprises of the Bilozersky and Kerch basins to the total ore production is less than 10%, and that the enterprises of Kryvyi Rih and Horishni Plavni operate, in fact, within the same basin, the general analysis in this paper is based on the production data of the Ferrexpo Poltava Mining Group. This will allow us to formalize the conclusions for all iron ore enterprises with an open-pit mining method with sufficient reliability. This paper presents a comparative analysis of the potential of renewable energy sources in the context of PJSC Poltava Mining and Processing Plant based on the calculations performed. It is established that the most promising direction for the development of distributed generation is wind and solar power plants. Taking into account the peculiarities of operation, it is recommended to focus on the construction of photovoltaic stations in the considered conditions.

Keywords: renewable energy, solar panels, wind power plant, energy, potential, generation, iron ore enterprise.

References

[1] Na mezhi isnuvannia: yak viina zminiue ukrainskyi promyslovyy sektor (On the brink of existence: how the war is changing the Ukrainian industrial sector). [Online]. Available: https://www.unian.ua/economics/other/viyna-proti-rosiji-yak-viyna-zminyuye-ukrajinskiy-promisloviy-	sektor-ostanni-novini-11928213.html. Accessed on: November 15, 2024. [2] Enerhetyka Ukrainy u chervni 2024 r. (Ukraine's energy sector in June 2024). [Online]. Available: https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf. Accessed on: November 04, 2024.

- [3] Rozporiadzhennia №761-r Kabinetu ministriv Ukrainy (13 serpnia 2024). *Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku ta planu zakhodiv z yoho vykonannia* [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine №761-p (August 13 2024). On approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030 and the action plan for its implementation.] Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>. Accessed on: December 15, 2024.
- [4] H. Legge, C. Müller-Falcke, T. Nauck, and E. Ostgren, «Creating the zero-carbon mine», 2021. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine>. Accessed on January 17, 2025.
- [5] T. Igogo, K. Awuah-Offei, A. Newman, T. Lowder, and J. Engel-Cox, «Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches», *Applied Energy*, vol. 300, article 117375, 2021. doi: **10.1016/j.apenergy.2021.117375**.
- [6] B.C. McLellan, G.D. Corder, D.P. Giurco, and K.N. Ishihara, «Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential», *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, pp. 32-44, 2012. doi: **10.1016/j.jclepro.2012.03.016**.
- [7] H. Abbaspour, and F. Abbaspour, «Renewable energy systems in the mining industry: a literature review and research agenda», *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 12, pp. 569-580, 2022. doi: **10.20508/ijrer.v12i1.12828.g8438**.
- [8] X. Li, Q. Gu, Q. Wang, J. Luo, D. Liu, and Y. Chang, «Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges», *Energy Strategy Reviews*, vol. 56, article 101597, 2024. doi: **10.1016/j.esr.2024.101597**.
- [9] A. Strazzabosco, J.H. Gruenhagen, and S. Cox, «A review of renewable energy practices in the Australian mining industry», *Energy Strategy Reviews*, vol. 56, article 101597, 2024. doi: **10.1016/j.esr.2024.101597**.
- [10] Y. Choi, and J. Song, «Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: a case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned sangdong mine, Korea», *Sustainability*, vol. 8, article 1320, 2016. doi: **10.3390/su8121320**.
- [11] M.H. Baig, D. Surovtseva, and E. Halawa, «The potential of concentrated solar power for remote mine sites in the northern territory, Australia», *Journal of Solar Energy, Journal of Solar Energy*, article 617356, pp. 1-10, 2015. doi: **10.1155/2015/617356**.
- [12] I. O. Sinchuk, *Komentar do stanu elektroenerhetyky zalizorudnykh pidpriemstv yak sehmenta yikh konkurento-spromozhnosti* [Commentary on the state of the electric power industry of iron ore enterprises as a segment of their competitiveness]. Kremenchuk, Ukraine: PE Shcherbatykh O.V. Publ., 2018. (Ukr.)
- [13] O.M. Sinchuk, I.O. Sinchuk, and O.V. Dozorenko, «Diahnostyka ta prohnozuvannia rivniv elektrospozhyvannia zalizorudnykh kopalen» [«Diagnostics and forecasting of the levels of electricity consumption of iron ore mines»], *Mikrosystemy, elektronika ta akustyka – Microsystems, electronics and acoustics*, vol. 24, № 2(109), pp. 25-32, 2019. doi: **10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731**. (Ukr.)
- [14] G.G. Pivnyak, M.M. Bilyi, and G.M. Bazhin, *Elektropostachannia hirnychyykh pidpriemstv: Do-vidkovyi posibnyk* [Electricity supply of mining enterprises: A reference manual]. Dnipropetrovsk, Ukraine: National Mining University Publ., 2008. (Ukr.)
- [15] O. Sinchuk et al., «Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines», *Mining of Mineral Deposits*, vol. 15 (4), pp. 25-33, 2021. doi: **10.33271/mining15.04.025**.
- [16] O.V. Dozorenko, «Enerhoefektyvna systema elektropostachannia terytorialno viddalenykh spozhyvachiv elektrychnoi enerhii hirnychozbahachuvalnykh kombinativ» [«Energy-efficient power supply system for geographically remote consumers of electricity at mining and processing plants»], PhD thesis, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, 2022. (Ukr.)
- [17] G. Pivnyak, F. Shkrabets, N. Neuberger, and D. Tsyplenkov, *Osnovy vitroenerhetyky : pidruchnyk* [Fundamentals of wind power : textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: NGU Publ., 2015. (Ukr.)
- [18] V.M. Holovko, *Vitroenerhetyka : navch. posib. dlia studentiv spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika, elektromekhanika»* [Wind power engineering : a textbook for students of specialty 141 «Electric power engineering, electrical engineering, electromechanics»]. Kyiv, Ukraine: KPI Igor Sikorsky Polytechnic Institute Publ., 2019. (Ukr.)
- [19] Pohoda Kremenchuk (Weather in Kremenchuk) [Online]. Available: <https://meteopost.com/city/19860/ua/>. Accessed on: January 10, 2025. (Ukr.)
- [20] Ukrainski enerhetychni systemy (Ukrainian energy system) [Online]. Available: <https://enersun.com.ua/ua/vetrogeneratoriy/>. Accessed on: January 15, 2025. (Ukr.)
- [21] Eurowind Energy [Online]. Available: <https://eurowindenergy.com/our-projects>. Accessed on: January 15, 2025.
- [22] *Pravyla proektuvannia vitrovyykh elektrychnykh stantsii* [Design rules for wind power plants], HKD 341.003.001.002-2000, Aug. 2000.
- [23] Risen Solar technology [Online]. Available: https://storage.ua.prom.st/1328014_risen_375_mhcp.pdf. Accessed on November 01, 2024.

- [24] D.V. Ryndiuk, T.V. Sheleshei, and I.S. Bednarska, *Netradytsiini dzhherela enerhii. Praktychni zaniattia : navch. posib. dlia stud. pershoho rinvnia vyshchoi osvity (bakalavr) spetsialnosti 144 «Teploenerhetyka»* [Non-traditional energy sources. Practical classes : a textbook for students of the first level of higher education (bachelor) specialty 144 «Heat and Power Engineering»]. Kyiv, Ukraine: KPI Igor Sikorsky Polytechnic Institute Publ., 2022. (Ukr.)
- [25] *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia* [Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, and fire. Building climatology], DSTU-N B V.1.1-27:2010, Nov. 2011. (Ukr.)
- [26] Powerspout TRG - Turgo turbine [Online]. Available: <https://www.esolar.co.nz/products-1/powerspout-hydro-trg>. Accessed on: November 11, 2024.
- [27] T.I. Zyma, and M.M. Khlapak, *Hidrotekhnichni sporudy: interaktyvnyi kompleks navchalno-metodychnoho zabezpechennia* [Hydraulic structures: an interactive complex of educational and methodological support]. Rivne, Ukraine: NUWHP Publ., 2009. (Ukr.)
- [28] V.G. Gubina, «Suchasnyi stan vidvaliv Inhuletskoho hirnycho-zbahachuvalnoho kombinatu» [«The current state of the dumps of the Ingulets mining and processing plant»], *Heokhimiia tekhnohenezu – Geochemistry of technogenesis*, iss. 9, pp. 43-49, 2023. doi: 10.32782/geotech2023.37.07.
- Стаття надійшла 15.03.2025
Стаття прийнята 02.04.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Оцінка потенціалу джерел відновлюваної енергетики в умовах залізорудних підприємств / Якимець С.М., Ходаковський М.С., Олійніченко М.Ю., Чорна В.О. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 140-153. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336322>.

ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ
В ПРОЦЕСІ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Ялова А.М.

канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: al.yalovaya@knu.edu.ua;

Бондар Н.В.

ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua;

Яловий О.О.

аспірант, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1356-2987>, e-mail: yalovoy2001@gmail.com

Мета дослідження. Дослідження різних підходів до зменшення впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість енергетичної системи та визначення оптимальної комбінації традиційних та відновлюваних джерел для забезпечення стабільного та надійного енергопостачання. Оцінка ефективності різних підходів до мінімізації впливу відновлюваних джерел енергії на стабільність енергомережі. **Матеріали і методи.** Методи аналізу власних значень та моделювання перехідних процесів. Використовувалися дані системного оператора «Укренерго»: графіки навантаження енергосистеми (погодинні, добові, сезонні). Використовувалися дані Українського гідрометцентру за 2023–2024 роки для моделювання вироблення ВДЕ: дані про сонячну радіацію (погодинні, добові); дані про швидкість вітру (погодинні, добові). Використовувалися технічні паспорти сонячних панелей та вітрових турбін, що встановлені в Україні. Для геоінформаційного аналізу використовувалась програма QGIS. У дослідженні використано теорію штучних нейронних мереж, методи оптимізації на базі лінійного програмування й логічних продукційних правил, а також методи оцінки й регулювання усталених режимів роботи системи з врахуванням енергетичного накопичувача. **Результати.** Наукова новизна полягає у розробці інноваційного методу оцінки зниження впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість енергосистеми. Доведено доцільність використання штучних нейронних мереж для прогнозування виробітку вітрової та сонячної енергії, а також оптимізації структури та параметрів моделі задля підвищення точності прогнозу. Визначено оптимальне поєднання традиційних та відновлюваних джерел енергії для забезпечення стійкої та надійної роботи енергосистеми. **Практичне значення.** На основі експериментальних та теоретичних досліджень надано конкретні рекомендації та рішення, спрямовані на забезпечення стійкості енергосистеми при інтеграції відновлюваних джерел енергії, включаючи оптимізацію управління, використання нових технологій та розвиток інфраструктури.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, генерація, прогноз, сонячна енергія, вітроенергетика.

Постановка проблеми

Згідно з дослідженнями Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), Україна має найбільший технічний потенціал для розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) серед країн Південно-Східної Європи. Це означає, що Україна має значні природні ресурси, які можна використовувати для виробництва енергії з відновлюваних джерел. На сьогоднішній день існує значний обсяг наукових досліджень, присвячених проблемам інтеграції відновлюваних джерел енергії та їхньому впливу на стійкість енергосистем. Ключовим напрямком є розробка оптимальних режимів роботи змішаних енергетичних систем, що поєднують відновлювані та класичні джерела енергії, з урахуванням економічної ефективності, екологічної безпеки та геополітичних ризиків. Дослідження також охоплюють широкий спектр економічних та соціальних наслідків, пов'язаних з переходом на відновлювані джерела енергії. Зокрема, проводяться детальні аналізи витрат на інвестування в ВДЕ, оцінка ефективності їхнього використання, а також досліджуються питання впливу цього переходу на ринок праці, якість життя населення, регіональний розвиток та енергетичну безпеку країни. Згідно з «Національним планом дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» до

війни Україна мала потужну галузь відновлюваної енергетики, з мільярдними інвестиціями. Однак окупація значної частини територій призвела до втрати чверті потужностей ВДЕ. Попри це, галузь продовжує працювати, забезпечуючи значну частку електроенергії, а також активно розвивається, особливо в сегменті сонячних електростанцій. Загалом протягом 2022–2023 років в Україні введено понад 650 МВт нових потужностей відновлюваної енергетики, з яких: 371 МВт – сонячні електростанції (з яких 287 МВт приватними домогосподарствами); 227 МВт – вітрові електростанції; 50 МВт – об'єкти біоенергетики (біомаса та біогаз); 1 МВт – малі гідроелектростанції [1]. Енергетична компанія ДТЕК «Дніпровські електромережі» за 2024 рік підключила до своїх мереж сім об'єктів «зеленої» генерації. Їхня загальна потужність здатна забезпечити електроенергією приблизно десять тисяч будинків. Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) створює спільне підприємство з відновлюваної енергетики з GOLDBECK SOLAR Group для України, яке має на меті розвиток до 500 МВт сонячних фотоелектричних проєктів протягом наступних 3–5 років. ЄБРР надає кредит у розмірі 62 мільйони євро для посилення енергетичної стійкості України шляхом підтримки української енергетичної групи GNG (ГалНафтоГаз) у

будівництві та експлуатації двох вітряних електростанцій в Україні загальною потужністю 147 МВт. Під час Конференції з відновлення України 2024 року в Берліні було підписано понад 100 міжнародних угод, серед яких важливе місце займають домовленості щодо енергетичного сектору. Зокрема, було укладено меморандуми з провідними компаніями, які передбачають розвиток децентралізованого виробництва електроенергії, збільшення використання ВДЕ, впровадження енергоефективних технологій, будівництво «розумних» мереж та відновлення гідроелектростанцій. Завдяки співпраці міжнародних донорів з Міністерством відновлення, Комітетом Верховної Ради України з енергетики та ЖКП, а також НКРЕКП, у 32 містах України встановлюються когенераційні установки для одночасного виробництва електро- та теплової енергії. У 2024 році вже було підключено 25 з 91 доставлених установок. Загалом, на той самий період, в Україні налічувалося близько 150 газопоршневих та газотурбінних установок. Також, «Укрзалізниця» створює компанію «УЗ Енерго» для будівництва нових енергетичних потужностей, здатних забезпечити як власні потреби, так і потреби споживачів. Компанія планує звести десятки газогенераторних установок загальною потужністю до 250 МВт, з яких перші 10 МВт мають бути введені в експлуатацію до початку зими. У зв'язку з цим проблема забезпечення стійкості енергосистеми при інтеграції відновлюваних джерел енергії залишається актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питаннями щодо загальних вимог до роботи вітрових та сонячних електростанцій в ЕЕС, дослідженням потенціалу та прогнозуванням розвитку ВДЕ займалися ряд українських науковців: Сінчук О.М., Яценко Л.В., Кириленко О.В., Кулик М.М., Мхітарян Н.М., Кудря С.О., Кузнецов М.П., Денисюк С.П., Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Павловський В.В., Василько П.Ф., Яндульський О.С., Дубовський С.В., Приймак М.В., Сегеда М.С., Дудурич О.Б. та інші. Більшість сучасних методів оцінки надійності енергосистем обмежується аналізом окремих періодів (пікові навантаження, мінімальні потреби, паводки) або використанням стандартних графіків. Це не дозволяє повноцінно оцінити роботу енергосистеми з урахуванням мінливої генерації від вітрових та сонячних електростанцій.

У монографії [2] представлено дослідження, що охоплюють широкий спектр питань, пов'язаних з перетворенням енергії з відновлюваних джерел (ВДЕ) на електричну та теплову енергію. Розглянуто такі джерела, як вітер, сонце, геотермальні води, малі річки та біомаса. Детально проаналізовано ефективні методи та засоби їхнього використання, типи енергетичного обладнання та принципи їхньої роботи. Окрім того, представлено особливості застосування ВДЕ в різних галузях економіки України та результати наукових

досліджень, проведених фахівцями Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Підручник [3] є комплексним посібником з відновлюваних джерел енергії, що охоплює основні принципи використання ВДЕ, конструкції та режими роботи відповідних енергетичних установок. У ньому представлено практичні приклади та міжнародний досвід експлуатації відновлюваних електростанцій, а також наведено методи розрахунку автономних систем ВДЕ. Підручник є результатом наукових досліджень авторів та доповнює їхні попередні публікації.

У роботі [4] розглянуто технології перетворення енергії з різних типів відновлюваних джерел, а саме: сонячної, вітрової, геотермальної, водної та біомаси, на електричну та теплову енергію. Представлено аналіз конструкцій, принципів роботи, параметрів та методів розрахунку установок, що працюють на ВДЕ. Окремо розглянуто питання ефективності та перспектив використання ВДЕ в контексті української енергетики.

Враховуючи постійно зростаючу потребу у тепловій та електричній енергії, дана робота зосереджена на поглибленому аналізі відновлюваних джерел енергії та їхнього впливу на стійкість енергосистеми, на розробці оптимальних стратегій для переходу до ВДЕ, що гарантують стійкість та надійність енергетичної галузі.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження різних підходів до зменшення впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість енергетичної системи та визначення оптимальної комбінації традиційних та відновлюваних джерел для забезпечення стабільного та надійного енергопостачання. Оцінка ефективності різних підходів до мінімізації впливу відновлюваних джерел енергії на стабільність енергомережі.

Виклад основного матеріалу

Згідно з оцінкою KSE Institute, станом на травень 2024 року, російська агресія призвела до повної руйнації ключових енергетичних об'єктів України, таких як Каховська та Дніпровська ГЕС, Зміївська та Трипільська ТЕС. Крім того, критичних пошкоджень зазнали понад 80% приватних теплових електростанцій, близько половини високовольтних підстанцій, практично всі нафтопереробні заводи та значна частина інфраструктури зберігання нафти та нафтопродуктів. Загальні прямі збитки енергетичного сектору України оцінюються в \$16,1 млрд. Також Україна втратила понад 9 ГВт потужностей генерації. Ці дані свідчать про масштабні руйнування енергетичної інфраструктури України внаслідок російської агресії, що створює серйозні виклики для енергетичної безпеки країни.

Світова енергетика переживає період значних змін: традиційні великі електростанції поступово замінюються розподіленою генерацією. У перспективі, з впровадженням Smart Grid та збільшенням частки розподіленої генерації, локальні енергомережі зможуть

працювати як самостійно, так і в складі загальної енергосистеми. На тлі стрімкого розвитку технологій та змін клімату енергетичний ринок зазнає суттєвої трансформації: енергія з товару перетворюється на послугу. Глобальні тенденції спрямовують енергетику від централізованого виробництва до розподілених систем та децентралізації. Споживачі стають активними учасниками ринку, перетворюючись на просьюмерів, що одночасно виробляють і споживають енергію та беруть участь у нових бізнес-моделях. Ці зміни, в свою чергу, породжують нові соціальні виклики. За даними Міжнародного енергетичного агентства, очікується, що до 2050 року глобальне енергоспоживання подвоїться порівняно з показниками 2015 року, досягнувши 41,3 трлн. кВт·год. Це ставить завдання збільшення виробництва енергії при одночасному зниженні її вартості. У структурі енергоспоживання все більшу роль відіграють альтернативні джерела енергії, які мають

значний вплив на розподіл енергетичних ресурсів (рис. 1) [5]. Одна з ключових відмінностей відновлюваних джерел енергії від викопного палива полягає в кількості викидів парникових газів, особливо вуглекислого газу.

Альтернативні джерела енергії мають свої можливості та обмеження. Доступність є важливим фактором в оцінці використання поновлюваних джерел виробництва електроенергії. Однак вони також схильні до певних обмежень. Наприклад, сонячну енергію можна отримувати лише вдень, за винятком періодів хмарної погоди. Щоб запобігти пошкодженням, вітрові турбіни зазвичай автоматично зупиняються, коли швидкість вітру перевищує 25 м/с. Також для ефективної генерації електроенергії потрібна швидкість вітру не менше 3 метрів за секунду. Геотермальна енергія здатна безперервно виробляти електроенергію впротягом 24 годин, проте вона обмежена географічно.

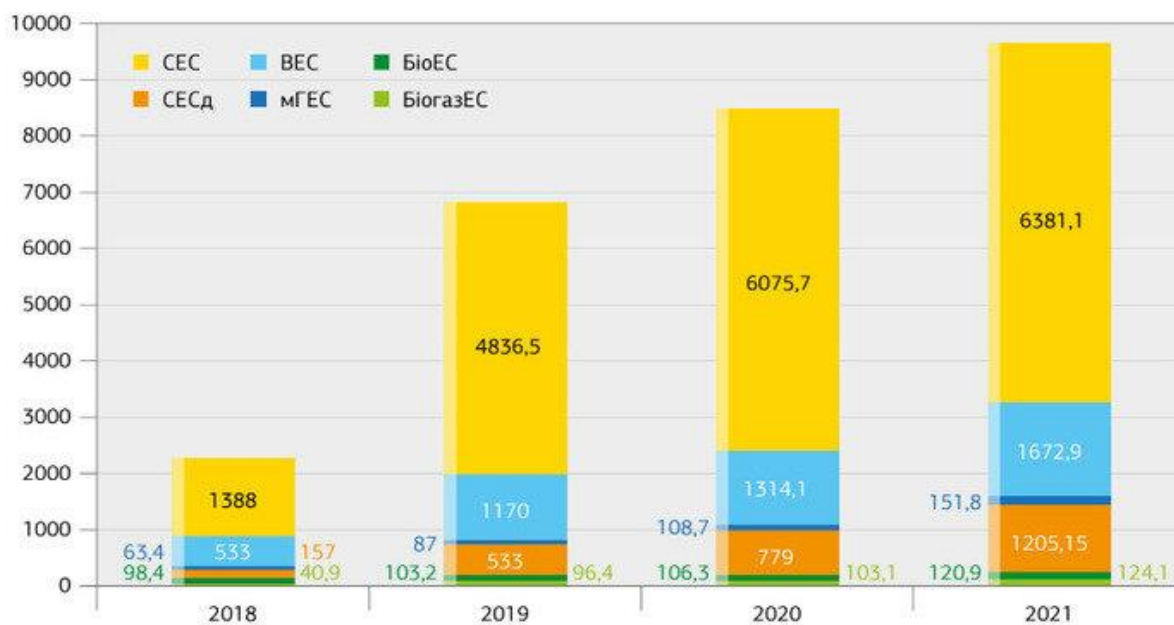


Рис. 1 – Динаміка росту встановленої потужності об'єктів ВДЕ, які працюють за «зеленим» тарифом, МВт [6]

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в енергосистему стикається з низкою проблем, які необхідно подолати для успішного переходу до стійкої енергетики. Ці проблеми можна класифікувати за такими напрямками: нерівномірність виробництва ВДЕ, модернізація інфраструктури, політико-регуляторні питання, фінансові аспекти, високі початкові інвестиції, доступ до фінансування, залучення приватного капіталу. Ключовою проблемою є нестабільність виробництва ВДЕ, що ускладнює балансування енергосистеми. Також необхідна масштабна модернізація мереж для інтеграції ВДЕ.

Розподільчі мережі електроенергії чутливі до різних видів перешкод, які можуть виникати як з боку генераторів, так і з боку споживачів. Ці перешкоди впливають на параметри якості електроенергії, що

призводить до змін у характеристиках електропостачання. Тому критично важливо постійно контролювати основні параметри, такі як напруга, частота та рівень шуму, щоб запобігти погіршенню якості електроенергії. Зважаючи на властиву відновлюваним джерелам енергії волатильність, зумовлену їх залежністю від метеорологічних факторів, актуальним є впровадження гібридних енергетичних систем, що включають засоби оперативного регулювання потужності. Однак оптимізація конфігурації таких систем, враховуючи особливості перетворення енергії ВДЕ, є складним завданням. Існуючі методології моделювання та оптимізації енергетичної інфраструктури часто не повною мірою враховують комплексну взаємодію вітрових, сонячних електростанцій, традиційних генеруючих потужностей, біогазових установок, двигунів

внутрішнього згоряння, мікротурбіни, паливних елементів, дизель-генераторів та накопичувачів енергії. Незважаючи на достатню вивченість економічних та фізичних характеристик окремих компонентів, необхідне поглиблене дослідження стохастичних аспектів функціонування інтегрованих систем. Стратегія енергетичного переходу до 2050 року передбачає повну заміну вугільних ТЕС на електростанції, що використовують відновлювані джерела енергії (сонце, вітер, біомаса), а також на газові електростанції з високою маневреністю (з можливим переходом на синтетичний газ з ВДЕ). Для забезпечення стабільності енергосистеми планується впровадження технологій накопичення та зберігання енергії, а також, можливо, нових ядерних технологій. Для ефективного контролю, моніторингу та оптимізації роботи енергетичної системи використовуються технології управління енергосистемою, а саме системи управління енергомережами (EMS), що базуються на комп'ютерних та інформаційних технологіях. Ключовим завданням систем управління енергомережами (EMS) є ефективне управління навантаженням. Це дозволяє операторам контролювати та регулювати енергоспоживання в мережі, щоб уникнути перевантажень та збалансувати попит і пропозицію. Крім того, важливими функціями EMS є прогнозування та планування. Використовуючи дані про виробництво та споживання енергії, системи прогнозують майбутній попит і планують роботу мережі. Це дозволяє операторам ефективно розподіляти ресурси та заздалегідь вживати заходів для управління змінами в навантаженні та генерації. Енергетичні системи з високим рівнем використання ВДЕ становлять особливу складність в управлінні енергетикою. Вони вимагають наявності пристроїв для зберігання енергії та забезпечення споживання в моменти відсутності зовнішньої генерації. Безсумнівно, технології накопичення енергії допомагають згладити коливання, спричинені переривчастим характером сонячної та вітрової генерації. Проте, з огляду на мінливість як самих джерел, так і споживчого попиту, лише акумуляторів недостатньо для повної реалізації енергетичного потенціалу. Складність ситуації виключає можливість універсального рішення або єдиної технології. Для ефективного використання енергії необхідне інтелектуальне управління системами накопичення, що базується на прогресивному програмному забезпеченні. Штучний інтелект (ШІ) дозволяє не просто керувати, а оптимізувати роботу системи в динамічно мінливих умовах. Поєднання відновлюваної енергії з інтелектуальними системами зберігання на базі ШІ може стати революційним підходом, що визначає розвиток енергетики. Цю концепцію можна позначити як «Інтелектуальний накопичувач енергії» (ИНЕ) [7].

Оператор енергосистеми України, НЕК «Укренерго», вже розпочав автоматизацію виробничих процесів, щоб повноцінно брати участь у торгівлі електроенергією на ринку ЄС як член ENTSO-E, включаючи участь у європейських аукціонах. Для системних

операторів, які є членами ENTSO-E, наявність автоматизованих систем управління є обов'язковою вимогою, що забезпечує прозорість для партнерів. Очевидно, що ці ж вимоги будуть застосовуватися до всіх енергетичних компаній України, які планують брати участь у торгах в країнах ЄС, що сприятиме розвитку можливостей енергетичних компаній у застосуванні технологій штучного інтелекту. Інтелектуальні системи накопичення енергії, що базуються на штучному інтелекті, відкривають шлях до створення інтелектуальних енергосистем. Комбінація ШІ, традиційних джерел енергії, таких як ТЕС, відновлюваних джерел та накопичувачів, дозволяє повністю реалізувати потенціал відновлюваної енергетики, приносячи користь як галузі, так і споживачам. В умовах декарбонізації, децентралізації та впровадження нових технологій, енергокомпанії використовують ШІ для балансування попиту та пропозиції, спричиненого зростанням частки відновлюваних джерел енергії. Жодна технологія сама по собі не є універсальним рішенням, але штучний інтелект, як елемент комплексних систем, забезпечує технологічний прогрес, необхідний для управління все більш складними енергетичними системами. В Україні процес впровадження ШІ тільки починається, і на даний момент існують лише загальні концептуальні підходи та попередній план розвитку. Концепція розвитку ШІ в Україні хоч і визначає основні напрямки, більше орієнтована на науково-дослідницьку сферу.

Міністерство енергетики України заявило про готовність до співпраці з метою використання досвіду Південної Кореї, яка є лідером у розвитку та впровадженні сучасних технологій в електроенергетиці, зокрема «розумних» мереж. ДТЕК Енерго впроваджує технології штучного інтелекту для підвищення ефективності управління технологічним процесом на теплових електростанціях. Застосовані технології ШІ в режимі реального часу аналізують сотні параметрів і визначають оптимальний режим роботи обладнання на основі історичних та поточних даних. ШІ надає машиністам котлів рекомендації щодо можливостей економії палива. За період реалізації проекту з 2019 по 2020 рік загальний економічний ефект склав 480 мільйонів гривень, що відображає вартість зекономленого палива порівняно з періодом, коли машиністи не використовували рекомендації ШІ.

Отже для прогнозування роботи гібридної станції ТЕС+ВДЕ було досліджено активаційні функції у нейромережах ReLU та Сігмоїд. Для кожної функції активації прихованого шару було проведено порівняльний аналіз двох методів навчання: традиційний стохастичний градієнтний спуск та адаптивний алгоритм навчання (Adam). Штучні нейронні мережі являють собою математичні моделі, втілені у програмних та апаратних системах, які функціонують за аналогією з біологічними нейронними мережами. Штучний нейрон функціонує так: на його вхід надходить безліч сигналів, кожен з яких є виходом іншого нейрона (рис. 2).

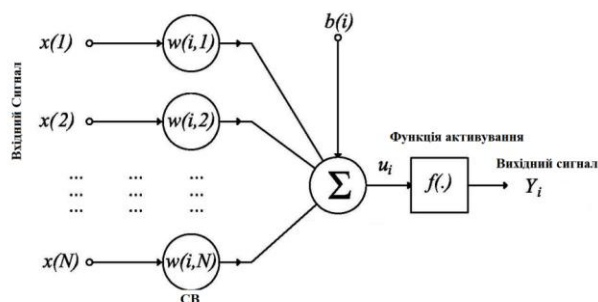


Рис. 2 – Модель активації нейрона

Ці вхідні сигнали множаться на відповідні вагові коефіцієнти, а отримані добутки сумуються, визначаючи рівень активації нейрона. У штучних нейронних мережах синаптичні ваги (СВ) – це числові значення, які визначають силу зв'язку між штучними нейронами. Було вирішено завдання прогнозування значень на основі погодинних вибірок швидкості вітрового потоку та погодинних вибірок сонячної інсоляції. Оскільки

диспетчерське управління в енергосистемі здійснюється погодинно, баланс електроенергії повинен підтримуватися для кожної години доби.

Нейрони, що використовують функцію активації, називаються ReLU (rectified linear unit). ReLU описується наступним виразом

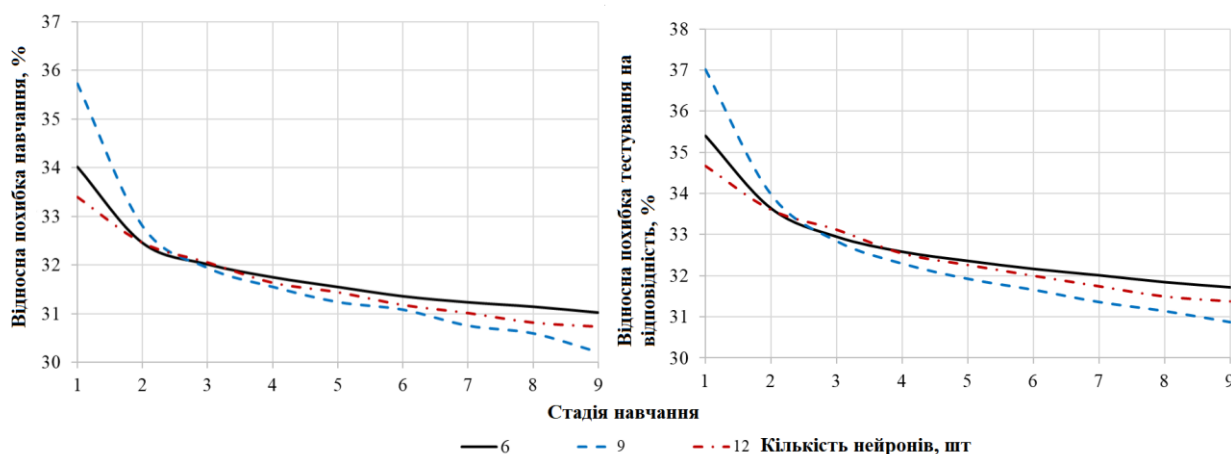
$$f(s) = \max(0, x).$$

Згідно отриманих даних відносної похибки прогнозу швидкості вітрового потоку взимку при кількості нейронів, 12,9,6, було обрано експериментальним шляхом значення кроку навчання 10^{-3} серед інших як оптимальне (рис. 3).

Сигмоїдна функція, на відміну від порогової, має неперервний характер і може набувати будь-яких значень у межах від 0 до 1. Вона визначається наступною формулою

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-ax}},$$

а – це параметр, що керує крутизною сигмоїдної кривої: чим більше значення а, тим різкіший перехід функції

Рис. 3 – Відносна похибка навчання прогнозу швидкості вітру взимку (Relu+Adam) із кроком $n=10^{-3}$

Для найбільш точного прогнозування швидкості вітру, як показали дослідження, оптимально використовувати функцію активації ReLU, навчаючи модель за допомогою алгоритму та встановлюючи крок навчання на рівні 10^{-3} . Згідно з результатами досліджень, для оптимального прогнозування сонячної інсоляції, найкраще використовувати функцію активації Sigmoid, застосовуючи адаптивний метод навчання Adam та крок навчання 10^{-3} .

Для прогнозування використовувалися погодинні дані, що дозволило отримати прогнозні значення швидкості вітру та сонячної інсоляції на добу для кожного з чотирьох сезонів: зими, весни, літа та осені. Було встановлено, що не тільки через принципові відмінності прогнозування сонячної та вітрової енергії, але й через відмінності між порами року, створення єдиної

універсальної моделі дасть меншу точність, ніж адаптація моделі до конкретного завдання.

Для прогнозування сонячної інсоляції середня помилка короткострокового прогнозу на годину вперед на тестуванні на відповідність вибірці склала від 0,8% влітку до 1,9% взимку, що, згідно зі світовим досвідом досліджень з цієї проблеми, свідчить про високу точність прогнозу. Зниження точності в зимовий період пояснюється великою кількістю днів з хмарністю та меншим рівнем сонячної інсоляції.

Середня помилка прогнозування швидкості вітру на тестуванні на відповідність вибірці склала від 26-34%. Для підвищення точності необхідно використовувати додаткові метеорологічні дані або дані дистанційного зондування Землі, що не входить до завдань цієї роботи. Проте, цей рівень прогнозування забезпечує з певною мірою ймовірності видачу гарантованої

потужності від вітроелектростанції. Причому, чим менша гарантована потужність окремої ВЕС, тим вища її ймовірність. Це зумовлено тим, що при будь-якій швидкості понад 12 м/с ВЕС може розвивати повну потужність, а в період з 3-12 м/с буде гарантована видача потужності на 5-8%.

Отримані результати дозволяють підвищити ефективність планування та оперативне управління сонячними та вітровими електростанціями для території України за рахунок більш точного прогнозування їх генерації.

Для балансування режимів в досліджуваній автономній енергосистемі на промисловій частоті, особливо в зимовий період, доцільно та необхідно залучення додаткових джерел генерації електроенергії на основі альтернативних джерел енергії, а саме вітрового потоку та сонячної інсоляції.

Ставиться завдання дати потенційну оцінку максимальної активної потужності, яку можна отримати на основі альтернативних джерел енергії. Враховуємо, що середньорічна температура повітря 9,0°C, середня місячна температура найбільш холодного місяця (січень) – мінус 3,7°C, найбільш жаркого – 22,1°C. Абсолютний максимум температури повітря за даними метеостанції м. Кривий Ріг +40°C, абсолютний мінімум – -35°C.

Щоб узгодити параметри сонячних панелей з параметрами інверторів, необхідно розрахувати оптимальну кількість послідовних та паралельних з'єднань. При цьому важливо, щоб сумарні значення напруги та струму не перевищували максимально допустимі параметри інверторів.

Таблиця 1

Схема з'єднань сонячних панелей

Тип з'єднання	Кількість сонячних панелей, шт.	Вхідні параметри	
		U, В	I, А
Послідовно	20	726,80	94,72
Паралельно	10		

Для оцінки максимальної продуктивності сонячної електростанції (СЕС) протягом дня, коли сонячне випромінювання завжди перпендикулярне до панелей, використовуються прогнози сонячної інсоляції, які були отримані в результаті попередніх досліджень. Для точного проектування сонячної електростанції необхідно враховувати реальну орієнтацію панелей у просторі при розрахунку інсоляції. Оскільки сонячні модулі, розташовані в різних частинах станції, мають різну орієнтацію, їх кут нахилу до горизонту та азимут відрізнятимуться, що суттєво впливає на кількість отриманої інсоляції для кожного модуля. Для забезпечення максимальної ефективності сонячних панелей кут їх нахилу регулюється залежно від сезону. Навесні та восени оптимальним вважається кут, що дорівнює широті місцевості, взимку він збільшується, а влітку зменшується на 10-15 градусів (рис. 4).

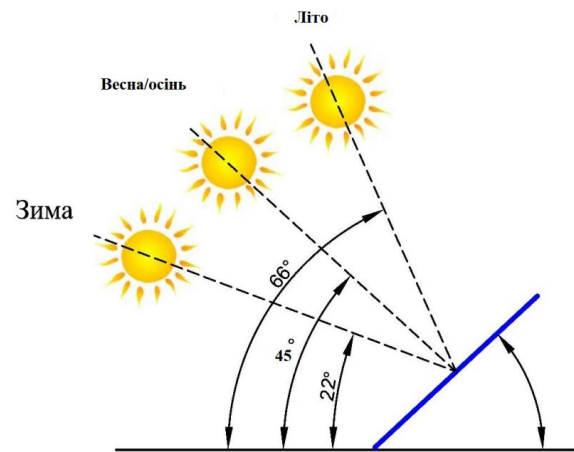


Рис. 4 – Положення сонця щодо сонячного модуля протягом року

Якщо зміна кута нахилу неможлива, його встановлюють на рівні широти місцевості. За даними багаторічних спостережень у м. Кривий Ріг максимальна величина сонячної радіації 591 МДж/м² за умов середньої хмарності припадає на липень, мінімальна – 75 МДж/м² на грудень. Протягом року характерно збільшення місячних сум сонячної радіації від лютого до березня і різке зниження від серпня до вересня (рис. 5).

Згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 – «Будівельна кліматологія» розглянута територія відноситься до III вітрового району. Нормативне значення вітрового явища 0,38кПа. Навесні, восени і взимку переважають вітри північно-східного і східного напрямів, влітку – західного і північно-західного. Максимальна швидкість вітру за даними ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 з середніх швидкостей по румбах за січень – 5,6 м/с, повторюваність штилів за січень – 9,2%. Мінімальна швидкість вітру з середніх швидкостей по румбах за липень – 4,5 м/с, повторюваність штилів – 15,4%, середньорічна швидкість вітру в районі міста за багаторічний період спостережень за даними метеостанції м. Кривий Ріг та Лощарівка – 4,6-5,0 м/с, максимальна – 28 м/с.

Територія міста Кривий Ріг, згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 – «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель», розташована в 2-ій зоні вологості – «степ». Середня за рік відносна вологість повітря – 74%. Середня швидкість вітру у січні становить від 4,0 до 6,0 м/сек. Сильні вітри (зі швидкістю понад 15 м/сек) відмічаються в середньому 29 днів на рік. В теплий період часто спостерігаються суховії – вітри східних румбів, які характеризуються швидкістю більше 5,7 м/сек. При дуже низькій відносній вологості повітря – 25-30%. Вони формуються навесні – початку літа [8].

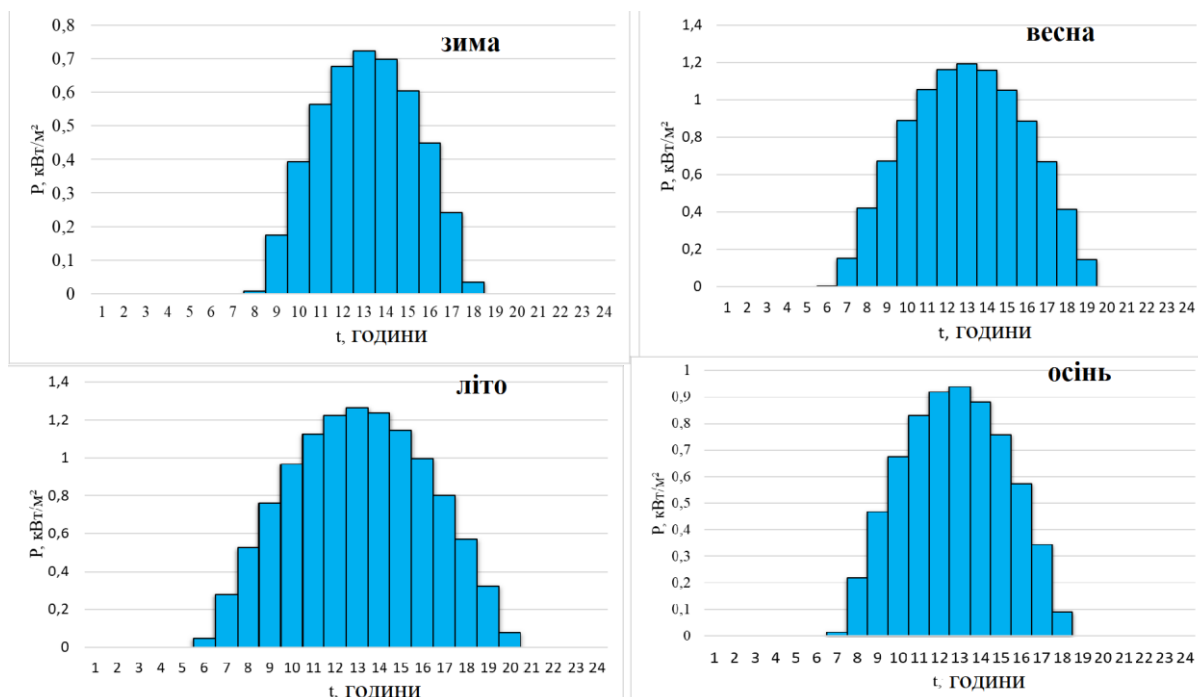


Рис. 5 – Сонячна інсоляція для характерного сезону

Після вивчення вітрових ресурсів Криворізького району було зроблено припущення по встановленню вітроелектростанції (ВЕС) з потужністю 10 МВт. Регіон відрізняється середнім вітровим потенціалом, з середньою річною швидкістю вітру 8,24 м/с на висоті 50 метрів, що є наближеним до оптимального для

виробництва вітрової енергії. Для розрахунку потужності ВЕС використано прогнозовані дані про швидкість вітру з попередніх досліджень. Графічне відображення результатів оцінки вироблення потужності вітроелектростанції в характерні дні кожного сезону представлено на рисунку 6.

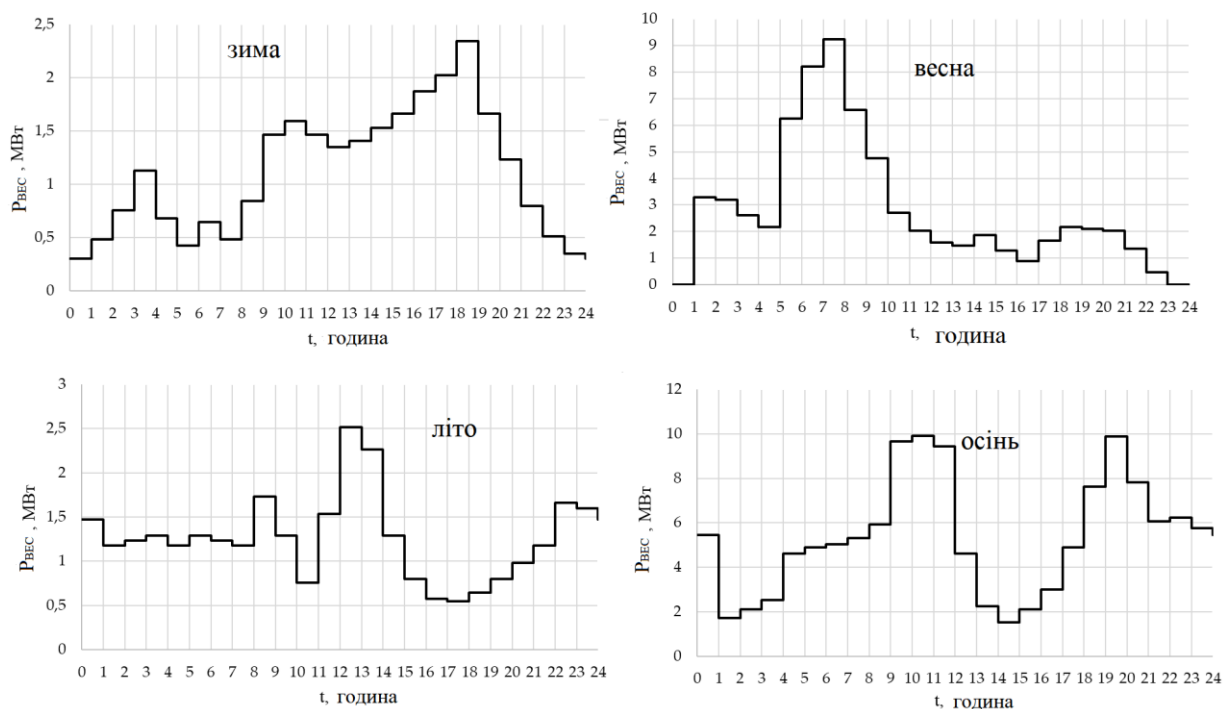


Рис. 6 – Вироблення потужності ВЕС для характерного сезону

Видно, що найбільшу потужність ВЕУ розвиває навесні та восени.

Одним з ключових елементів будь-якої автономної електростанції є система накопичення енергії в акумуляторних батареях, що забезпечує необхідну мобільність станцій. Це обладнання дозволяє оптимізувати роботу вітрової електростанції в періоди відсутності або недостатності вітру, а також під час планових або аварійних ремонтів, використовуючи накопичену енергію при надлишку генерації. Ці батареї повинні мати високу ємність та витримувати велику кількість циклів заряду-розряду. Враховуючи широке застосування літій-іонних акумуляторів, у цій роботі розглядається можливість використання надпровідних індукційних накопичувачів (НІН).

У рамках дослідження було розроблено програмне забезпечення для оптимального планування вибору складу генерувальних джерел в межах добового інтервалу часу. Алгоритм роботи програми ґрунтується на методі лінійного програмування з використанням системи умов, поданих у вигляді продукційних правил.

Наприклад, якщо сумарна потужність ТЕС повністю задовольняє потребу автономної системи в електроенергії, інші джерела генерації не залучаються. Якщо ж потужність ТЕС недостатня для покриття навантаження, тоді залучається наступне джерело з нижчою собівартістю виробництва електроенергії – у цьому випадку ВЕС.

Розглянута автономна енергосистема, основним джерелом генерації якої є ТЕС, визначена як основне джерело енергії, а вітроенергетичні установки та сонячні електростанції – як альтернативні. Накопичувач енергії розглядається як балансуєчий елемент. Відповідно до запропонованого алгоритму, можуть бути виконані розрахунки для кожної доби на відповідному сезонному інтервалі року.

Алгоритм передбачає використання джерела з найнижчою собівартістю електроенергії для базового навантаження: взимку – теплоелектростанцій, влітку – сонячних станцій. Пікове навантаження покривається за допомогою накопичувача енергії або альтернативних джерел за наявності достатньої потужності.

Дослідження показало, що ВДЕ можуть забезпечити більшість добового споживання, крім ранкових і вечірніх піків, коли виникає дефіцит потужності. Для його покриття необхідне використання накопичувача, який повинен працювати з 17:00 до 23:00. У ранкові години (6:00–12:00) висока швидкість вітру дозволяє заряджати накопичувач. Для покриття ранкових пікових навантажень, коли споживання електроенергії та тепла різко зростає, Криворізька ТЕС використовує наступні заходи: маневрування енергоблоками, використання резервного палива, автоматизовані системи управління.

Висновки

У ході проведеного дослідження визначено потенційно ефективний спосіб спільної роботи традиційних та альтернативних джерел енергії у складі гібридної електростанції, спрямований на зниження фінансових витрат і підвищення енергоефективності під час експлуатації. Запропонований метод та алгоритм оптимізації енергоспоживання дозволяють мінімізувати фінансові витрати груп споживачів електроенергії, які мають можливість вибору джерела живлення з традиційних (енергія ТЕС) та альтернативних (енергія ВЕС та СЕС) джерел. Розглянута модель включає накопичувач енергії, який відіграє основну балансуєчу роль в електростанції та тим самим дозволяє мінімізувати ризики недовиробництва енергії ВЕС, зумовлені непередбачуваним характером генерації останніх. Оцінка надійності гібридних систем виробництва електроенергії з використанням ВДЕ, що мають суттєві відмінності в структурі, системах управління, типах використовуваних перетворювачів тощо, має велике значення з точки зору оптимізації розподілу енергії. Проведене дослідження було мотивоване необхідністю підвищення економічної життєздатності інтегрованих систем відновлюваної енергетики і, зокрема автономних, що не тільки відіграє центральну роль в інтеграції змінних ВДЕ в рамках глобальних зусиль з вирішення проблеми зміни клімату та децентралізації енергетики, але також має важливе значення для забезпечення загального надійного доступу до недорогих, надійних, стійких та сучасних джерел енергії.

Перелік використаних джерел

- [1] Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.12.2024).
- [2] Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 492 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
- [3] Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювальна енергетика : підручник / Сінчук О.М., Бойко С.М., Сінчук І.О., Ялова А.М. Кременчук, 2017. 218 с. URL: <http://aespt.knu.edu.ua/student/educational-materials/> (дата звернення: 15.10.2024).
- [4] Сегеда М.С., Олійник М.Й., Дудурич О.Б. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії : навч. посіб. Львів : вид-во Львів. Політехніки, 2019. 203 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Segeda_2019_204.pdf (дата звернення: 30.10.2024).
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: <https://www.irena.org/> (дата звернення: 17.12.2024).

- [6] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/> (дата звернення: 15.12.2024).
- [7] Meena M., Reddy R. Smart energy storage systems review on determining efficient battery management systems. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 08(02). Pp. 662-668. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.8.2.0334>.
- [8] ЗВІТ з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності по об'єкту РЕКОНСТРУКЦІЯ ПЛ 150 КВ Л-161/162 ПС «КРИВ.ТЕС-2» - ПС «ГПП-4 ІНГОКА», ДІЛЯНКА ОПОР № 8-19. Дніпро, 2020. URL: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/uploads/public/602/f79/08a/602f7908a5b4c825189541.pdf> (дата звернення: 05.09.2024).

APPROACHES TO ENSURING THE STABILITY OF THE ENERGY SYSTEM IN THE PROCESS OF INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Yalova A.	PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0926-542X , e-mail: al.yalovaya@knu.edu.ua ;
Bondar N.	senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8713-265X , e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua ;
Yalovoy O.	postgraduate student, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1356-2987 , e-mail: yalovoy2001@gmail.com

Purpose of the Study. The study aims to investigate various approaches to mitigating the impact of renewable energy sources on the stability of the power system and to determine the optimal combination of conventional and renewable energy sources to ensure stable and reliable energy supply. The effectiveness of different approaches to minimizing the impact of renewable energy on grid stability is evaluated. **Materials and Methods.** Methods of eigenvalue analysis and transient process modeling were used. Correlation and regression analysis methods were used to assess the impact of renewable energy sources (RES) on the stability of the energy system. Data from the system operator «Ukrenergo» were used, including power system load schedules (hourly, daily, seasonal). Data from the Ukrainian Hydrometeorological Center for the years 2023–2024 were used to model RES generation: data on solar radiation (hourly, daily) and wind speed (hourly, daily). Technical specifications of solar panels and wind turbines installed in Ukraine were also used. The QGIS software was utilized for geoinformation analysis. The study employed artificial neural network theory, optimization methods based on linear programming and logical production rules, as well as methods for assessing and regulating steady-state operating conditions of the system, taking into account energy storage devices. **Results.** The scientific novelty lies in the development of an innovative method for assessing the reduction of the impact of renewable energy sources on power system stability. The feasibility of using artificial neural networks to forecast wind and solar power generation was demonstrated, as well as the optimization of the model structure and parameters to improve forecasting accuracy. The optimal combination of conventional and renewable energy sources was determined to ensure stable and reliable operation of the power system. **Practical Significance.** Based on experimental and theoretical research, specific recommendations and solutions are provided aimed at ensuring the stability of the power system during the integration of renewable energy sources, including optimization of management, use of new technologies, and infrastructure development.

Keywords: renewable energy sources, generation, forecast, solar energy, thermal power plants, wind power.

References

- [1] Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhe-tyky na period do 2030 roku (National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030). [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>. Accessed on: December 10, 2024. (Ukr.)
- [2] S. Kudria, *Vidnovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine Publ., 2020. [Online]. Available: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf. Accessed on: December 10, 2024. (Ukr.)
- [3] O. Sinchuk, S. Boyko, I. Sinchuk, and A. Yalova, *Spetsialni rozdiily enerhetyky. Netradytsiina ta vidnovliuvalna enerhetyka : pidruchnyk* [Special sections of energy. Unconventional and renewable energy : textbook]. Kremenichuk, Ukraine, 2017. [Online]. Available: <http://aespt.knu.edu.ua/student/educational-materials/>. Accessed on: October 15, 2024. (Ukr.)
- [4] M. Sehed, M. Oliinyk, and O. Dudurych, *Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela elektroenerhii : navch. posib.* [Non-traditional and renewable electricity sources : textbook]. Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Publ., 2019. [Online]. Available:

- https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Segeda_2019_204.pdf. Accessed on: October 30, 2024. (Ukr.)
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). [Online]. Available: <https://www.irena.org/>. Accessed on: December 17, 2024.
- [6] Natsionalna komisiia, shcho zdiisniuiie derzhavne rehuliuivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh (National Commission for State Regulation in Energy and Utilities). [Online]. Available: <https://www.nerc.gov.ua/>. Accessed on: December 15, 2024. (Ukr.)
- [7] M. Meena, and R. Reddy, «Smart energy storage systems review on determining efficient battery management systems», *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 08(02), pp. 662–668, 2023. doi: 10.30574/ijrsra.2023.8.2.0334.
- [8] «Zvit z otsinky vplyvu na dovkillia planovanoi diialnosti po obiekту REKONSTRUKTSIIA PL 150 KV L-161/162 PS «KRYV.TES-2» - PS «HPP-4 INHOKA», DILLANKA OPOR № 8-19» [«Report on the environmental impact assessment of the planned activity on the object reconstruction of FL 150 kV L-161/162 PS «Kryv.TTES-2»-PS «GPP-4 Ingka», plot of supports № 8-19»], 2020. [Online]. Available: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/uploads/public/602/f79/08a/602f7908a5b4c825189541.pdf>. Accessed on: September 5, 2024. (Ukr.)
- Стаття надійшла 16.05.2025
Стаття прийнята 29.05.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Ялова А.М., Бондар Н.В., Яловий О.О. Підходи до забезпечення стійкості енергетичної системи в процесі інтеграції відновлюваних джерел енергії. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 154-163. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336326>.

144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.18:662.998:004.94

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336329

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВОДОТРУБНО-ДИМОГАРНИХ КОТЛІВ ПРИ РОБОТІ НА БІОГАЗІ

Дульський А.І. аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3331-6241>, e-mail: anton201799@gmail.com;
Сірий О.А. канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5811-9037>, e-mail: o.siryi@kpi.ua

Досліджено робочий процес водотрубно-димогоарного котла ВК 32 при переході з природного газу на біогаз (70% CH₄, 30 % CO₂) із застосуванням CFD моделювання. Верифікована на експериментальних даних модель дозволила оцінити вплив зміни палива на процес горіння, структуру температурного поля та утворення оксидів азоту. Проаналізовано гідродинаміку паливно повітряних струменів і розраховано безрозмірний гідродинамічний параметр q . Підкреслено важливість модернізації існуючого теплотехнічного обладнання. Запропоновано адаптаційні заходи – коригування геометрії паливникового колектора – для забезпечення стабільності факела та ефективної роботи котла на паливі з нижчою теплотворною здатністю.

Ключові слова: біогаз, котел ВК-32, CFD-моделювання, викиди NO_x, адаптація паливника.

Постановка проблеми

На тлі глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, скороченням запасів традиційних енергоресурсів та геополітичними ризиками постачання імпортованого палива, особливої актуальності набуває використання альтернативних палив об'єктами промисловості та енергетики [1]. Одним із ключових аспектів у цьому напрямі є впровадження відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазу, що утворюється в результаті анаеробного розкладу органічних речовин та має потенціал заміни природного газу в низькотемпературних системах теплозабезпечення.

Склад біогазу наступний: 50-70% метану (CH₄), решта – це вуглекислий газ (CO₂), а також у незначних кількостях водень (H₂), сірководень (H₂S), азот (N₂) та водяна пара (зазвичай до 3% за об'ємом разом) [2, 3]. Біогаз вважається кліматично нейтральним паливом, адже під час його спалювання викиди CO₂ компенсуються тим, що цей газ уже перебував у біологічному кругообігу, а також за рахунок утилізації метану, який у разі неконтрольованого викиду в атмосферу має значно вищий парниковий потенціал [3].

Слід зазначити, що застосування біогазу вимагає вирішення низки технічних проблем. Його теплота згорання (до 25 МДж/м³) значно нижча за аналогічний показник природного газу (≈35 МДж/м³), а склад істотно змінюється залежно від сировини та технології виробництва [2, 3]. Ці фактори впливають на повноту згорання, якість тепловіддачі, рівень емісії токсичних компонентів (зокрема оксидів азоту – NO_x), стабілізацію полум'я, а також можуть призводити до пошкоджень або зниження ефективності роботи котельного обладнання.

Варто зазначити, що в Україні усі види газів поділяються на категорії та групи відповідно до їхніх характеристик горіння [[4]]. Основним критерієм сумісності паливникових пристроїв із різними видами газу є індекс Воббе. За виконання рівності (1) газові прилади, здатні ефективно і безпечно функціонувати при використанні порівнюваних газів без змін у конструкції обладнання чи коригування режимів його роботи.

$$W_{o1} = W_{o2} = \text{const} \pm 5\%, \quad (1)$$

де W_{o1} , W_{o2} – числа Воббе для газу, який використовується, і того, що замінює.

$$W_o = \frac{Q_n^p}{\sqrt{\rho}}, \quad (2)$$

де Q_n^p – нижча теплота згорання газу, кДж/м³, ρ – відносна густина газу.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{пов}}}, \quad (3)$$

де ρ_g , $\rho_{\text{пов}}$ – густина горючого газу і повітря на горіння за однакових умов, кг/м³ [5].

Для біогазу із вмістом метану в межах 50-70% його значення коливається в діапазоні 17,6-27,1 МДж/м³, що суттєво нижче за показники природного газу групи L (≈ 39,1-44,8 МДж/м³). Відповідно, без відповідних інженерних змін у конструкції або режимах роботи паливника стабільна експлуатація обладнання на біогазі є малоімовірною.

Через нестабільність параметрів біогазу та обмеженість виробництва його використання доцільно насамперед у малопотужних системах локального теплозабезпечення. Такі системи мають потенціал до адаптації під змінний склад палива та можуть ефективно функціонувати за умов локального або сезонного постачання біогазу. Враховуючи ці обставини, актуальним є дослідження можливості адаптації типових

зразків котельного обладнання, що широко застосовуються в Україні, до роботи на біогазі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Згідно з [6, 7], робота паливоспалювального устаткування залежить від технології горіння. Раціональна організація процесу підвищує енергоефективність і надійність систем паливовикористання та визначається ефективністю паливкової системи. Однією з універсальних технологій горіння є ефективні палинкові пристрої струмінево-нішевого типу.

Перспективним рішенням у цьому контексті є модернізація або оптимізація палинкових пристроїв та систем подачі повітря під конкретні властивості біогазу. Універсальним рішенням може бути впровадження струмінево-нішевої технології (СНТ), яка забезпечує ефективне змішування палива з окиснювачем, стабільне горіння та авторегулювання суміші за рахунок особливої течії газів. Вона також дозволяє охолоджувати паливник і попередньо підігрівати паливо, підвищуючи енергоефективність устаткування в цілому [8].

Об'єктом дослідження в роботі є процес горіння палива у водогрійному котлі ВК-32, який широко використовується в Україні. Основним інструментом обрано чисельне моделювання горіння біогазової суміші в робочому об'ємі реверсивної топки та жаротрубної ділянки котельного агрегату.

Котел ВК-32 – це сталевий двоходовий водотрубно-димогарний котел із реверсивною камерою згоряння та водоохолоджуваними елементами (включаючи передні дверцята). Він розрахований на спалювання газоподібного або рідкого палива та має високу ефективність (ККД до 92%) [9]. Завдяки простоті конструкції, надійності та доступності в обслуговуванні, цей котел залишається актуальним навіть за умов змін у паливному балансі. Особливої уваги заслуговує його потенціал для адаптації до біогазу за рахунок модернізації палинкових пристроїв та коригування режимів подачі повітря. Враховуючи зазначені особливості, котел ВК-32 розглядається в якості базового об'єкту дослідження в цій роботі.

Мета статті

Метою даної роботи є аналітична оцінка адаптивності наявної конструкції котла та паливкового пристрою до використання біогазу як палива, без проведення дороговартісних натурних випробувань. В якості основного інструменту досліджень застосовується CFD-модель процесу горіння, достовірність якої підтверджена експериментом. Застосування математичного моделювання дозволяє:

- дослідити вплив зміни складу палива на глибину його вигорання;
- оцінити зміну температурного поля в камері згоряння та прилеглих теплопередавальних елементах;

- прогнозувати рівень емісії оксидів азоту (NO_x) при відповідному режимі роботи;

- дослідити гідродинамічні характеристики потоку, зокрема параметр далекобійності струменя, що визначає глибину проникнення палива в зону реакції.

Таке дослідження може бути корисним для України, враховуючи її потужний аграрний сектор та потенціал для виробництва біогазу, зокрема з відходів тваринництва, агропереробки та органіки в побутових відходах [10].

Виклад основного матеріалу

У цьому дослідженні було виконано чисельне моделювання процесу спалювання біогазу у водогрійному котлі типу ВК-32 (рис. 1) із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). З метою підвищення достовірності результатів і верифікації побудованої моделі, на першому етапі було створено цифровий прототип котла, який відтворює умови та геометрію вже реалізованого експерименту (таблиця 1 дослідження 1) зі спалювання природного газу з використанням встановленого паливника СНТ. На цьому етапі було проведено порівняння розрахункових даних із експериментальними результатами, що дозволило оцінити адекватність математичної моделі, граничних умов та фізичних підходів. Лише після підтвердження коректності моделі в умовах спалювання природного газу було здійснено перехід до моделювання процесу спалювання біогазу, із врахуванням змін у складі палива, термохімічних характеристиках та потенційних відмінностях у розподілах температури та продуктів згоряння.



Рис. 1 – Водогрійний котел ВК-32 (КСВа-2.5)

Для чисельного дослідження до розгляду прийнято повну геометричну модель котла (розрахункова область дещо спрощена на окремих стінках камери горіння), включно з каналом паливника. На рис. 2 зображена спрощена 3D модель котла з паливником в розрізі, та розрахункова область.

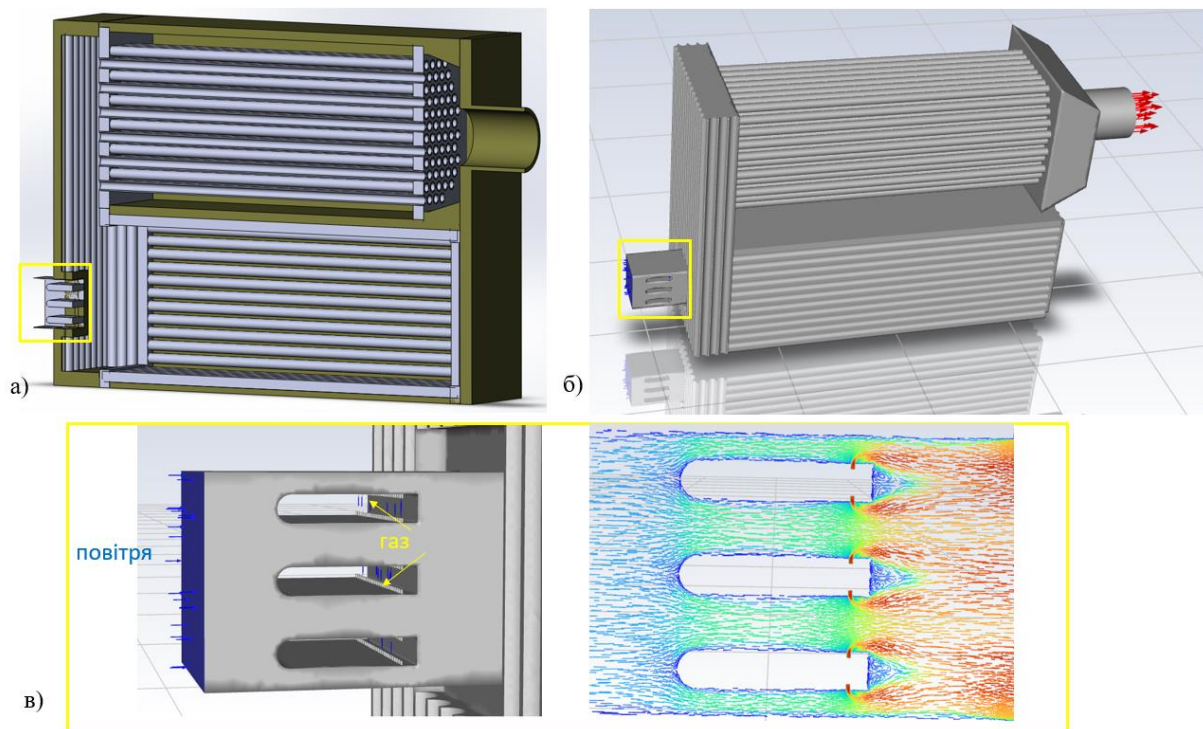


Рис. 2 – а – спрощена 3D модель ВК-32 (КСВа-2.5) з пальником в розрізі; б – розрахункова модель; в – розрахункова модель пальника та рух паливо-повітряної суміші в ньому

Чисельне моделювання процесу горіння виконувалося в середовищі ANSYS Fluent із використанням комплексу фізико-хімічних моделей, що дозволяють коректно описати характерні явища високотемпературного потоку продуктів згорання в газовому тракті котельного обладнання. Основою є одностадійна модель горіння метану, реалізована в комбінації з підходом Eddy Dissipation (Volumetric). Такий підхід дозволяє враховувати як кінетичні обмеження хімічних реакцій, так і вплив турбулентного змішування, що є визначальним у паливних камерах котлів із великомасштабним турбулентним потоком та нерівномірним розподілом температур. У Volumetric-реалізації додатково враховується тепловиділення у кожному об'ємі, що підвищує точність моделювання температурних полів.

Розрахунок променистого теплообміну виконувався методом сферичних гармонік в 1 наближенні (т. зв. P1 модель). P1 Radiation Model – компромісне рішення між точністю та обчислювальною ефективністю. На відміну від обчислювально дорогих моделей, таких як DO, вона забезпечує задовільну точність при помірних витратах ресурсів, що підтверджено в численних дослідженнях промислових пальникових пристроїв [[11]].

Для опису турбулентної течії застосовано модель k-ε Realizable з активованими опціями Curvature Correction та Enhanced Wall Treatment. Модифікація Realizable забезпечує покращене відтворення турбулентних потоків із великими деформаціями та вихорами, що робить її більш стійкою й точною для задач із

складною геометрією та вираженими тепловими градієнтами – типовими для котлів. Опція Curvature Correction підвищує точність у зонах різкої зміни напрямку потоку, таких як дверний газохід чи вхід до трубного пучка. Застосування Enhanced Wall Treatment забезпечує коректне моделювання граничного шару при комбінованій структурі обчислювальної сітки завдяки адаптації до локального значення y^+ – безрозмірного параметра, що визначає положення першого вузла сітки відносно стінки у задачах моделювання турбулентних течій. Значення y^+ дозволяє оцінити, наскільки точно сітка описує граничний шар, що є особливо важливим для достовірного прогнозування тепловіддачі від продуктів згорання до охолоджуваних поверхонь.

Математично модель описується системою рівнянь, яка включає:

- Рівняння нерозривності (Continuity Equation) – забезпечує збереження маси;
- Рівняння Нав'є-Стокса (Momentum Equations) – описує рух стискуваної, в'язкої рідини з урахуванням турбулентності;
- Рівняння енергії (Energy Equation) – необхідне для врахування теплових ефектів, зокрема горіння та теплообміну;
- Рівняння збереження компонентів суміші (Species Transport) – моделює перенос та хімічні реакції між газовими компонентами [[12]].

Найважливішим етапом CFD-моделювання є побудова якісної обчислювальної сітки. Вона визначає

точність, стабільність і швидкість збіжності розрахунку. Розмір і структура сітки суттєво впливають на обчислювальні витрати та загальний час моделювання [[11]]. Тому особливу увагу було приділено її побудові. В області камери згоряння та фронтальних дверцят котла було виконано локальне згущення сітки біля стінок (рис. 3а), для забезпечення адекватного опису градієнтів температури і швидкості, що критично важливо при моделюванні теплообміну між газами та теплообмінними поверхнями котла.

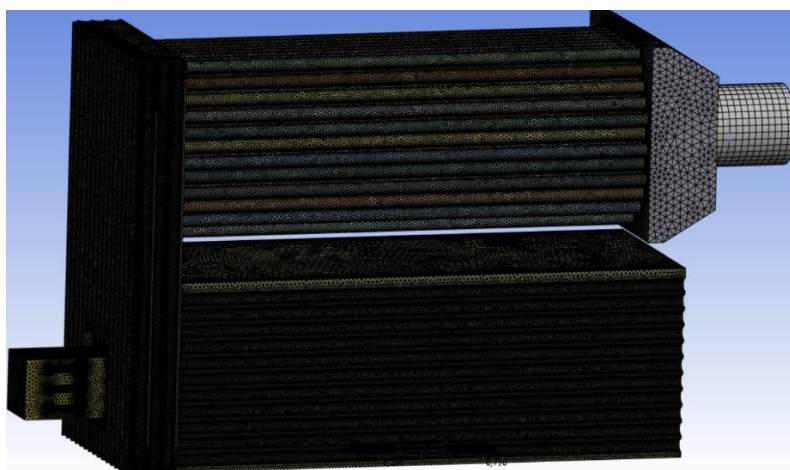
В зоні горизонтального трубного пучка був застосований метод Inflation, який створює кілька концентрованих шарів елементів біля стінок труб (рис. 3б). Цей підхід дозволяє коректно передавати теплові потоки за рахунок моделювання пограничного шару – області, де відбувається основна частина теплопередачі за рахунок конвекції. Правильна реалізація пограничного

шару критично впливає на точність розрахунку теплового навантаження на стінки і загальний розподіл температури.

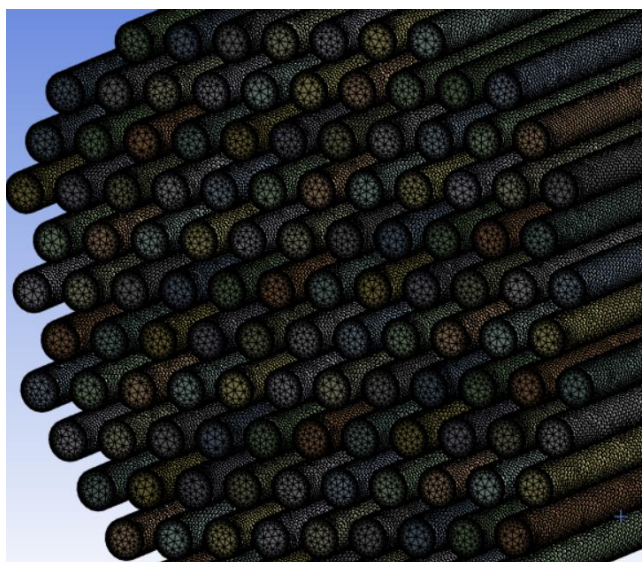
Модель була розбита на 128 об'ємів для можливості використання різних налаштувань сітки під конкретні зони. Якість сітки оцінювалась за такими критеріями:

- Aspect Ratio – співвідношення сторін елемента
- Orthogonality – ортогональність елементів
- Skewness – кривизна елемента або ступінь спотворення
- Smoothness – гладкість зміни розміру елементів або плавність переходів

Усі показники після перевірки перевищували мінімально допустимі значення, що забезпечило достатню стійкість і точність розрахунків.



а)



б)

Рис. 3 – Скінченно елементна сітка: а – вся розрахункова область, б – трубний пучок

Для моделювання теплообміну через металеві стінки котла була використана опція Shell Conduction, яка дозволяє задавати товщину, матеріал і температуру стінки (відповідно до технічних характеристик і режиму роботи котла) без необхідності її детального розбиття в 3D. Такий підхід значно зменшує складність геометрії та навантаження на обчислювальну сітку, зберігаючи при цьому точність теплопередачі.

На вхід розрахункової області застосовано умову типу Mass Flow Inlet із фіксованою масовою витратою та температурою вхідного потоку. На виході задано умову Pressure Outlet зі сталим значенням статичного тиску (відповідно до режиму роботи котла). Параметри реагуючих потоків, що задавались на вході, наведено в таблиці 1. Для спрощення дослідження замість природного газу було використано чистий метан. Його дещо вищу теплотворну здатність було компенсовано шляхом регулювання витрати палива.

При проведенні дослідження 1 значення для верифікації розрахунку бралися результати газового аналізу за котлом, а саме: викиди NO_x , температура димових газів, і порівнювались з середнім по площі значенням в розрізі вихідної димової труби розрахункової моделі. В таблиці 2 представлено результати. Результати моделювання виявили відхилення від експериментальних даних на рівні до 10%. Така невідповідність може бути зумовлена рядом факторів, зокрема використанням спрощених фізичних моделей – моделі випромінювання P1 та моделі турбулентного горіння Eddy Dissipation. Крім того, хоча якість обчислювальної

сітки загалом є задовільною для даного типу задач, її просторове згущення не є максимальним, що також могло певною мірою вплинути на точність відтворення локальних параметрів потоку та теплообміну.

Комбінований вплив цих факторів призводить до накопичення похибки. Проте, з урахуванням наявних обчислювальних потужностей, отримана точність є гранично досяжною для даної задачі.

У моделюванні горіння біогазу граничні умови були задані відповідно до Таблиці 1 (Дослідження 2). Для подачі палива обрано конфігурацію пальникового колектору, яка продемонструвала найкращі результати у попередньому дослідженні [[13]].

Витрата біогазу обиралася з точки зору забезпечення теплової потужності агрегату, як у Дослідженні 1. Це дозволяє здійснити коректне порівняння впливу типу палива за однакової теплової потужності на температурний розподіл, інтенсивність теплообміну та рівень утворення оксидів азоту.

На рис. 3, 4 наведено порівняння температурних розподілів у вертикальних осевих перетинах двох досліджень, а в таблиці 3 – середні значення викидів NO_x та температури димових газів на виході з димової труби розрахункової моделі.

Для біогазу спостерігається зниження пікових температур і зменшення викидів оксидів азоту, що узгоджується з попередніми роботами [13-15], які підтверджують вплив додавання CO_2 на зниження температури горіння та зниження викидів NO_x .

Таблиця 1

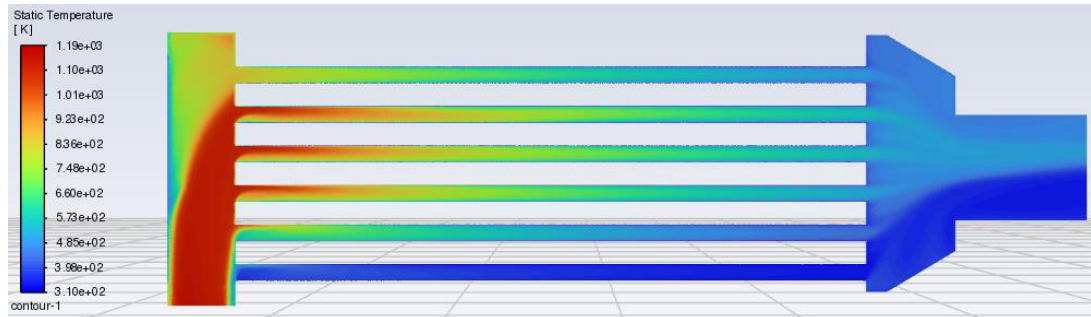
Граничні умови що задавались на вході, навантаження котла 107%

Найменування величини	Позначення	Розмірність	Дослідження 1	Дослідження 2	
Паливна суміш			Природний газ	Біогаз	
Компоненти			CH_4	CH_4	CO_2
Об'ємний вміст компоненту		%	100	70	30
Теплотворна здібність палива	$Q_{\text{нр}}$	МДж/м ³	35	25	
Витрата палива	$G_{\text{нг}}$	нм ³ /год	310	442.7	
Коефіцієнт надлишку повітря	α	-	1,32	1,32	
Температура повітря	$T_{\text{п}}$	°C	15	15	
Температура газу	$T_{\text{г}}$	°C	15	15	

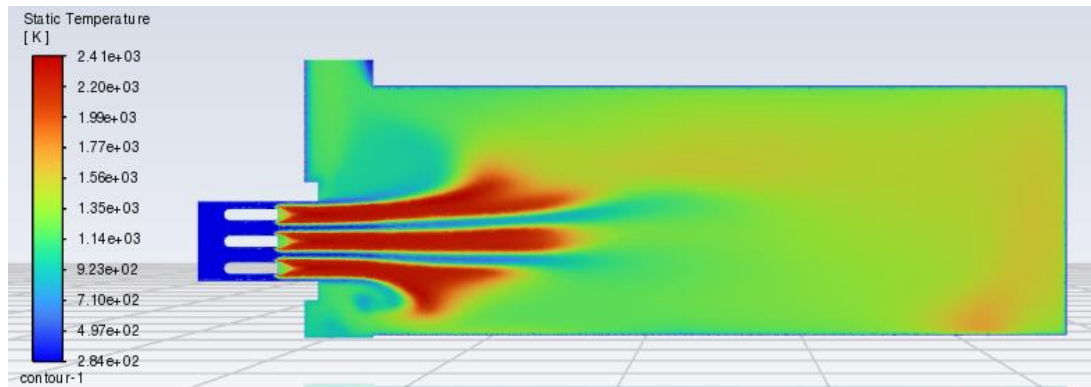
Таблиця 2

Верифікація результатів чисельного дослідження

Результати газового аналізу за котлом	Одиниця виміру	Експериментальне дослідження	CFD дослідження
Температура димових газів	°C	136	150
Вміст оксидів азоту	ppm	41	46

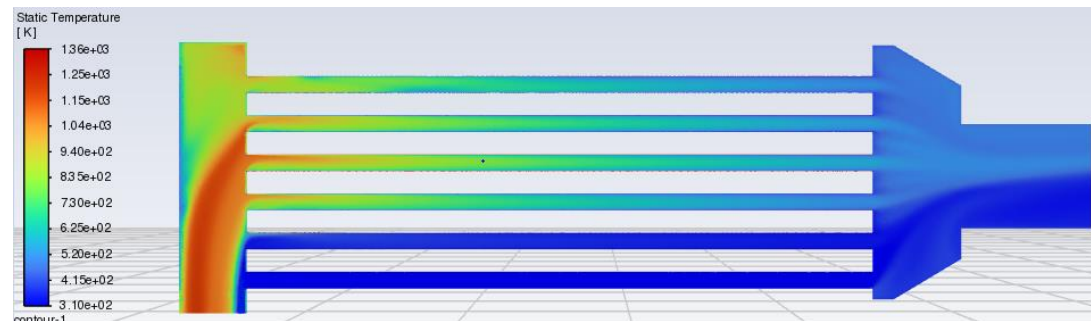


а)

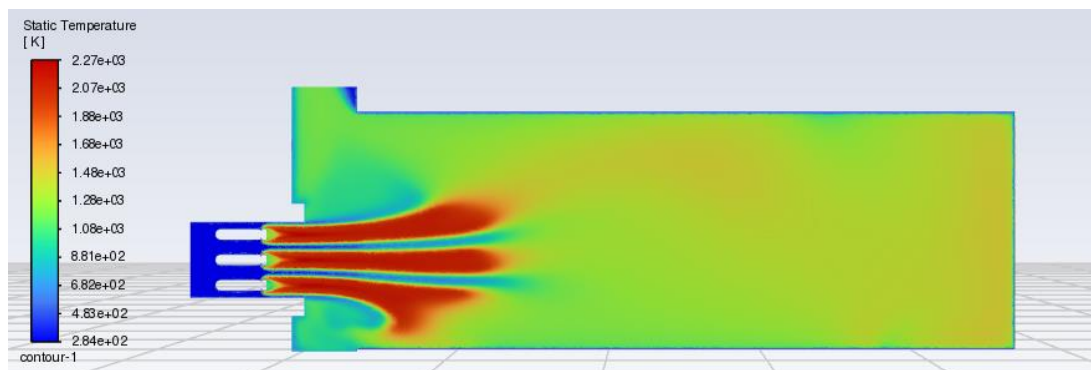


б)

Рис. 3 - Порівняння температурного поля продуктів згоряння у вертикальному осьових перетинах, для Дослідження 1:
а) жаротрубний теплообмінний пучок б) камера горіння з трубними екранами



а)



б)

Рис. 4 – Порівняння температурного поля продуктів згоряння у вертикальному осьових перетинах, для Дослідження 2:
а) жаротрубний теплообмінний пучок б) камера горіння з трубними екранами

Таблиця 3

Порівняння досліджень на виході з димової труби розрахункової моделі

Середні значення на виході з димової труби розрахункової моделі	Од. виміру	Дослідження 1	Дослідження 2
Температура димових газів	°C	150	160
Вміст оксидів азоту	ppm	46	20

Незважаючи на зниження температури в камері горіння, температура на виході з котла зросла на 10°C. Це може свідчити про погіршення теплообміну внаслідок додавання баластового газу CO₂, що пояснюється низькою теплопровідністю та вищою питомою теплоємністю цього газу, – він довше утримує тепло, що корелюється з [15]. Крім того, збільшення загального об'єму газової суміші підвищує швидкість руху продуктів згоряння через котел, а отже зменшує час їх перебування в зоні теплообміну.

Далекобійність паливних струменів відіграє ключову роль у роботі пальників СНТ, оскільки впливає на стабілізацію факела та ефективність процесу горіння. Це особливо важливо в умовах суттєвих змін витрати та в'язкості газів. Параметр, що характеризує далекобійність струменя, – це гідродинамічне відношення q , яке визначається як відношення динамічних напорів палива та окисника.

$$q = (\rho_r \cdot W_r^2) / (\rho_n \cdot W_n^2), \quad (4)$$

де ρ_r , ρ_n – густина пального газу і повітря відповідно, W_r і W_n – швидкість газу і повітря.

Так в пальнику дослідження 1, де $d=3$, $s/d = 4$, $q = 25.93$, а у випадку дослідження 2, де $d=4$, $s/d = 3$, $q = 28.53$. Такі близькі значення параметра q свідчать про вдалий підбір геометричних характеристик газового колектора для біогазу, що дозволяє забезпечити подібну далекобійність струменів та, відповідно, стабільність процесу горіння порівняно з умовами для природного газу.

Висновки

В результаті проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

– Моделювання процесу горіння на природному газі показало задовільну відповідність експериментальним даним, з відхиленням не більше 10%, що підтверджує коректність застосованої чисельної моделі;

– Застосування біогазу з вмістом 30% CO₂ призводить до зниження пікових температур у камері горіння та емісії NO_x, проте спостерігається зростання температури димових газів на 10°C, що пояснюється погіршенням теплообміну через фізичні властивості CO₂;

– Проведений розрахунок гідродинамічного відношення q для обох типів палива засвідчив, що при оптимальному підборі геометрії газового колектора (збільшення діаметра газоподавального отвору) для біогазу забезпечується подібна далекобійність струменів, що необхідно для стабільного горіння;

– Отримані результати дозволяють зробити висновок про можливість використання біогазу в існуючих паливних системах за умов належного коригування геометричних параметрів паливорозподілу пальника для забезпечення стабільності факела та ефективності горіння.

В роботі запропонована методика математичного моделювання горіння біогазу в котлі ВК-32, яка може бути використана при моделюванні робочого процесу багатоходових жаротрубних водогрійних котлів.

Перелік використаних джерел

- [1] Дульський А.І., Сторожук М.С. Альтернативні палива в енергетиці, проблеми та перспективи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73), № 5. С. 300-309. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/46>.
- [2] Особливості синтезу системи виробництва і спалювання біогазу на спиртзаводі / Боднар Л.А., Денесяк Д.І., Іщенко К.О., Лукьянець А.С. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2009. Вип. 25, № 2. С. 145-151. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-145-151>.
- [3] Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion / B. Bharathiraja et al. *Renewable and sustainable Energy reviews*. 2018. Vol. 90(April). Pp. 570-582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>.
- [4] Колієнко А.Г., Крошка О.В. Горючий газ й ефективність його використання в Україні: основні проблемні питання. Ч. 2. URL: <https://bizagro.com.ua/goryuchyj-gaz-j-efektyvnist-jogo-vykorystannya-v-ukrayini-osnovni-problemni-pytannya-2/> (дата звернення: 15.04.2025).
- [5] Бондар Л.А., Куленко О.О. Особливості спалювання суміші газів в промислових теплогенеруючих установках. *Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 21-23 червня 2023 р. С. 1-3.
- [6] Абдулін М.З., Горбань К.С., Сірий О.А. Взаємозв'язок робочого процесу паливкового пристрою на основі струменево-нішової технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Вип. 41(3). С. 63-69. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2019.9>.

- [7] Сірий О.А., Кобилянська О.О. Шляхи покращення сталості горіння в стабілізаторних елементах прямооточних пальникових систем. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2023, т. 34(73), № 5. С. 310-315. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/47>.
- [8] Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменево-нішевій системі спалювання палива. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29(68), № 1(2). С. 55-60.
- [9] Технічні характеристики Котла сталевого водогрійного КСВа-2,5 «ВК-32». URL: <https://megavat.com.ua/products/kotly-vodogrijni/kotly-stalevi-vodogrijni-ksva-vk-32/ksva-2-5-vk-32/> (дата звернення: 10.03.2025).
- [10] Токарчук Д.М., Пришляк Н.В., Паламаренко Я.В. Перспективи використання відходів рослинництва на виробництво біогазу в Україні. *Агросвіт*. 2020, Вип. 22. С. 51-57. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2020.22.51>.
- [11] Impact of P-1 radiation model on simulated free jet flame characteristics of gaseous fuels: CFD with PDF approach / H.F. Elattar et al. *Thermal Science*. Vol. 27, no. 5B. Pp. 3921-3938. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI230109038E>.
- [12] Noor M., Wandel A., Yusaf T. Detail guide for CFD on the simulation of biogas combustion in bluff-body mild burner. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013)*, Pahang, Malaysia, July 1-4, 2013. Pp. 1-25.
- [13] Дульський А.І., Сірий О.А. CFD-Моделювання процесу спалювання суміші метан-біогаз у струменево-нішевому стабілізаторі полум'я. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35(74), № 5. С. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/02>.
- [14] Mordaunt C.J., Pierce W.C. Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping concentration in CH₄ to emulate biogas combustion. *Fuel*. 2014. Vol. 124. Pp. 258-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.097>.
- [15] The role of dilution level and canonical configuration in the modeling of MILD combustion systems with internal recirculation / G. Ceriello et al. *Fuel*. 2020. Vol. 264. Article 116840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116840>.

RESEARCH OF THE WORKING PROCESS OF WATER-TUBE/FIRE-TUBE BOILERS OPERATING ON BIOGAS

Dulskiy A.

postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3331-6241>, e-mail: anton201799@gmail.com;

Siriyi O.

PhD (Engineering), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5811-9037>, e-mail: o.siriyi@kpi.ua

The transition to sustainable energy sources is of critical importance in the context of global climate change, geopolitical instability in fuel supply, and the depletion of fossil energy resources. Biogas, produced through the anaerobic decomposition of organic matter, is considered a promising renewable alternative to natural gas in low-temperature heating systems. However, its variable composition, reduced calorific value, and high carbon dioxide content create significant technical limitations for its use in conventional burner equipment. These factors necessitate a comprehensive evaluation of the capability of existing boiler systems to operate effectively under conditions of fuel substitution. The article is dedicated to the analysis of the main operational challenges arising during the combustion of biogas in thermal energy systems. Issues related to flame stability, thermal efficiency, and emission control are examined. The study evaluates the substitution of natural gas with biogas under conditions close to real operation. Particular attention is paid to the influence of the physico-chemical properties of the fuel on combustion behavior and heat transfer efficiency. Computational fluid dynamics (CFD) methods are applied to model the thermochemical processes occurring within the combustion chamber of a fire-tube boiler. The study includes an assessment of the temperature field, fuel-air mixture interaction, and the formation of pollutants, particularly nitrogen oxides. The role of burner geometry in maintaining stable combustion during the transition to biogas is determined. The hydrodynamic behavior of fuel jets is investigated to assess their impact on flame stability and propagation. The influence of CO₂ dilution in the fuel mixture on temperature gradients and heat transfer processes is analyzed, as it may potentially lead to reduced efficiency. The interaction of fuel and oxidizer flows is discussed to evaluate jet penetration and mixing quality under varying fuel compositions. As a result, the possibility of adapting conventional thermal equipment to operate on renewable gaseous fuels is substantiated. A numerical approach to modeling the combustion process of biogas in a VK-

32 boiler is proposed, which can be adapted for simulating heat exchange processes in similar types of fire-tube hot water boilers.

Keywords: biogas, VK-32 boiler, CFD modeling, NOx emissions, burner adaptation.

References

- [1] A.I. Dul'skyi, and M.S. Storozhuk, «Alternatyvni palyva v enerhetytsi, problemy ta perspektyvy» [«Alternative fuels in energy, problems and prospects»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 34(73), № 5, pp. 300-309, 2023. doi: 10.32782/2663-5941/2023.5/46. (Ukr.)
- [2] L. Bodnar, D. Denysiak, K. Ishchenko, and A. Lukanets, «Osoblyvosti syntezy systemy vyrobnytstva i spalivannia biohazu na spyrtzavodi» [«Characteristics of synthesis the production system and biophase sizing at alcohol factory»], *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktivni v budivnytstvi – Modern technologies, materials and design in construction*, vol. 25, no. 2, pp. 145–151, 2019. doi: 10.31649/2311-1429-2018-2-145-151. (Ukr.)
- [3] B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar, S. Chozharendhan, and J. Iyyappan, (2018). «Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion», *Renewable and sustainable Energy reviews* vol. 90, pp. 570-582, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.093.
- [4] A.H. Koliienko, and O.V. Kroshka, «Horiuchy haz y efektyvnist yoho vykorystannia v Ukraini: osnovni problemni pytannia. Ch. 2» [«Combustible gas and the efficiency of its use in Ukraine: main problematic issues. Part 2»]. 2025. [Online]. Available: <https://bizagro.com.ua/goryuchy-gaz-j-efektyvnist-jogo-vykorystannia-v-ukrayini-osnovni-problemni-pytannia-2/>. Accessed on: April 15, 2025. (Ukr.)
- [5] Bondar L.A., Kulenko O.O. «Osoblyvosti spalivannia sumishi haziv v promyslovykh teploenergiichnykh ustanovkakh» [«Features of combustion of gas mixtures in industrial heat generating plants»], in *Proc. LII Sci.-techn. Conf. of VNTU Departments, Vinnytsia, Ukraine, 2023*, pp. 1-3. (Ukr.)
- [6] M. Abdulin, K. Horban, and O. Siryy, «Vzaimozv'язok robochoho protsesu palnykovoho prystroiu na osnovi strumenevo-nishovoi tekhnologii spalivannia hazu z ekolohichnyimi aspektami roboty vohnetekhnichnykh ob'ektiv» [«Interrelation of working process of the burner device based on stream-niche technology of gas burning with environmental aspects of fireengineering object's work»], *Teplofizyka ta teploenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, vol. 41(3), pp. 63-69, 2019. doi: 10.31472/ttpe.3.2019.9. (Ukr.)
- [7] O.A. Siryi, and O.O. Kobylianska, «Шляхи покращення сталості горіння в стабілізаторних елементах прямоочних пальникових систем» [«Ways of improving stability of combustion in stabilizer elements of direct flow burner systems»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 34(73), № 5, pp. 310-315, 2023. doi: 10.32782/2663-5941/2023.5/47. (Ukr.)
- [8] M. Abdulin, and O. Siryy, «Doslidzhennia stalosti protsesu horinnia u strumenevo-nishevii systemi spalivannia palyva» [«Stability analysis of combustion action in the jet-niche system of burning fuel»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 29(68), № 1(2), pp. 55-60, 2018. (Ukr.)
- [9] Tekhnichni kharakterystyky Kotla stalevoho vodohriinoho KSVa-2,5 «VK-32» (Technical characteristics of the steel water-heating boiler KSVa-2.5 «VK-32»). [Online]. Available: <https://megavat.com.ua/products/kotly-vodogrijni/kotly-stalevi-vodogrijni-ksva-vk-32/ksva-2-5-vk-32/>. Accessed on: March 10, 2025. (Ukr.)
- [10] D. Tokarchuk, N. Prishlyak, and Y. Palamarenko, «Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv roslynnytstva na vyrobnytstvo biohazu v Ukraini» [«Prospects for use of crop waste for biogas production in Ukraine»], *Ahrosvit*, vol. 22, pp. 51-57, 2020. doi: 10.32702/2306-6792.2020.22.51. (Ukr.)
- [11] H.F. Elattar, E. Specht, B.A. Almohammadi, M.H. Mohamed, and H.A. Refaey, «Impact of P-1 radiation model on simulated free jet flame characteristics of gaseous fuels: CFD with PDF approach», *Thermal Science*, vol. 27, no. 5B, pp. 3921-3938, 2023. doi: 10.2298/TSCI230109038E.
- [12] M. Noor, A. Wandel, and T. Yusaf, «Detail guide for CFD on the simulation of biogas combustion in bluff-body mild burner», in *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013)*, Pahang, Malaysia, 2013, pp. 1-25.
- [13] A.I. Dul'skyi, and O.A. Siryi, «CFD-Modeliuvannia protsesu spalivannia sumishi metan-biohaz u strumenevo-nishevomu stabilizatori polumia» [«CFD modeling of the combustion process of methane-biogas mixture in a jet-niche flame stabilizer»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 35(74), № 5, pp. 6-12, 2024. doi: 10.32782/2663-5941/2024.5.2/02.
- [14] C.J. Mordaunt, and W.C. Pierce, «Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping

concentration in CH₄ to emulate biogas combustion», *Fuel*, vol. 124, pp. 258-268, 2014. doi: 10.1016/j.fuel.2014.01.097.

recirculation», *Fuel*, vol. 264, article 116840, 2020. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116840.

- [15] G. Ceriello, G. Sorrentino, A. Cavaliere, P. Sabia, M. de Joannon, and R. Ragucci, «The role of dilution level and canonical configuration in the modeling of MILD combustion systems with internal

Стаття надійшла 17.05.2025

Стаття прийнята 01.06.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Дульський А.І., Сірий О.А. Дослідження робочого процесу водотрубно-димогарних котлів при роботі на біогазі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 50. С. 164-173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336329>.

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 681.5:629.5

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336333

DESIGN OF DISTRIBUTED AUTOMATED SHIP'S CONTROL SYSTEMS BASED ON OPC UA TECHNOLOGY

Polyvoda V.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7742-255X , e-mail: polyvodavv@gmail.com ;
Polyvoda O.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6323-3739 , e-mail: pov81@ukr.net

The OPC Unified Architecture (OPC UA) is a platform-independent, secure, and scalable communication protocol for industrial automation and control systems. It provides a standardized way for devices from different manufacturers to communicate and exchange data, regardless of their underlying technology or operating system. This interoperability enables the seamless integration of various components within a distributed automated control system (DACS), leading to improved efficiency, reliability, and flexibility. In the maritime industry, the adoption of OPC UA technology has the potential to revolutionize the design and operation of ships. By implementing OPC UA, shipyards and ship owners can achieve greater control over their vessels, optimize operations, and reduce maintenance costs. OPC UA can be used to connect a wide range of devices and systems on a ship, including sensors, actuators, controllers, and human-machine interfaces (HMIs). This enables the collection and analysis of real-time data from various sources, providing valuable insights into the ship's performance and health. One of the key benefits of using OPC UA in the design of DACS is its ability to facilitate remote monitoring and control. By integrating OPC UA with cloud-based technologies, ship operators can access and manage their vessels from anywhere in the world. This allows for proactive maintenance, timely troubleshooting, and remote diagnostics, reducing downtime and increasing operational efficiency. Another significant advantage of OPC UA is its support for information modelling. This allows for the creation of standardized data models that can be used to describe the physical components and processes on a ship. By using these models, engineers can design and implement DACS more efficiently, reducing the risk of errors and inconsistencies.

Keywords: OPC UA, distributed automated control systems, maritime industry.

Statement of the problem

Advancing beyond traditional centralized systems, Distributed Automated Control Systems (DACS) [1, 2] utilize a network of controllers to monitor and manage industrial operations. This distribution of control functions provides a multitude of advantages:

- Reliability: If one controller fails, the system can continue to operate, minimizing downtime.

- Scalability: DACSs can easily be expanded to accommodate new processes or increased production capacity.

- Flexibility: Individual controllers can be tailored to specific process requirements, enhancing efficiency.

Key components of a DACS:

- Controllers: These devices perform the actual control functions, such as regulating temperature, pressure, or flow.

- I/O Modules: These modules connect the controllers to sensors and actuators, allowing them to receive data and send control signals.

- Communication Network: This network links the controllers, I/O modules, and other system components, enabling data exchange and coordination.

- Operator Interface: Human-machine interface (HMI) make possible to monitor the process, make adjustments, and respond to alarms for operators.

Common applications of DACS:

- Manufacturing: Chemical plants, refineries, food processing facilities

- Power generation: Power plants, hydroelectric stations

- Water and wastewater treatment: Treatment plants, distribution networks

- Oil and gas: Exploration, production, and refining

- Pharmaceutical: Manufacturing and packaging

Advantages gained by implementing a DACS are the following:

- Improved efficiency: Optimized process control can lead to increased productivity and reduced waste.

- Enhanced safety: Automated monitoring and control can help prevent accidents and minimize risks.

- Reduced costs: Efficient operations and lower maintenance requirements can result in significant cost savings.

- Better decision-making: Real-time data and analytics can support informed decision-making.

By distributing control functions and leveraging advanced technology, DACSs provide a reliable, scalable, and flexible solution for automating industrial processes.

Research Relevance.

The maritime industry is undergoing a significant transformation driven by the need for increased efficiency, safety, and environmental sustainability. Distributed Automated Control Systems (DACS) play a crucial role in achieving these goals by enabling the monitoring and control of complex onboard systems, such as propulsion, power generation, and cargo handling. However, traditional maritime DACS architectures often suffer from interoperability issues, limited scalability, and inadequate security, hindering their ability to meet the demands of modern maritime operations.

OPC Unified Architecture (OPC UA) emerges as a promising solution to address these challenges. Its platform-independent, service-oriented architecture provides a standardized framework for secure and reliable data exchange, enabling seamless integration of diverse onboard systems and devices. The relevance of OPC UA in the context of maritime DACS is evident in the following aspects:

1. Enhanced Interoperability: OPC UA facilitates the integration of systems from different manufacturers, eliminating vendor lock-in and enabling the creation of more flexible and cost-effective maritime DACS [3]. This is particularly important in the maritime industry, where vessels often incorporate a wide range of equipment from various suppliers.

2. Improved Data Accessibility and Exchange: OPC UA provides a unified data model that enables seamless access to real-time and historical data from various onboard systems [4]. This capability is crucial for advanced monitoring, diagnostics, and predictive maintenance, leading to improved operational efficiency and reduced downtime.

3. Strengthened Cybersecurity: OPC UA incorporates robust security mechanisms, including authentication, authorization, and encryption, to protect critical control systems from cyber threats. This is particularly important in the maritime industry, where vessels are increasingly connected to shore-based networks and vulnerable to cyberattacks.

4. Scalability and Flexibility: OPC UA's service-oriented architecture enables the easy addition and removal of devices and systems, facilitating the scalability and flexibility of maritime DACS. This is essential for adapting to changing operational requirements and integrating new technologies, such as IoT and cloud computing.

Support for Autonomous Shipping: As the maritime industry moves towards autonomous shipping, OPC UA's ability to provide secure and reliable data exchange is crucial for enabling the integration of autonomous navigation, collision avoidance, and remote monitoring systems.

By leveraging OPC UA's capabilities, maritime DACS can achieve higher levels of interoperability, security, and scalability, leading to improved operational efficiency, safety, and environmental sustainability. This

research aims to demonstrate the practical application of OPC UA in maritime DACS and highlight its potential to revolutionize the maritime industry.

Problem Statement.

Distributed Automated Control Systems (DACS) are integral to modern industrial operations, enabling the control and monitoring of complex processes across geographically dispersed locations. However, the inherent complexity and heterogeneity of DACS present several challenges that hinder their efficiency, interoperability, and scalability. Traditional DACS architectures often rely on proprietary communication protocols, leading to vendor lock-in and difficulties in integrating devices and systems from different manufacturers. This lack of standardization results in fragmented data exchange, limited real-time capabilities, and increased maintenance costs.

Furthermore, the increasing demand for real-time data analysis and predictive maintenance in Industry 4.0 environments necessitates a robust and secure communication infrastructure. Existing solutions often struggle to provide the required level of security, reliability, and performance for critical control applications. The need for seamless integration with enterprise-level systems, cloud platforms, and IoT devices further exacerbates these challenges.

To address these limitations, this paper investigates the application of OPC Unified Architecture (OPC UA) as a solution for enhancing the interoperability, security, and scalability of DACS. OPC UA is a platform-independent, service-oriented architecture that provides a standardized framework for industrial communication. By leveraging OPC UA's capabilities, this research aims to demonstrate how it can overcome the limitations of traditional DACS architectures and enable the development of more efficient, secure, and future-proof industrial control systems.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) [4] continues to be a cornerstone for industrial interoperability. Recent research and publications have focused on expanding its capabilities, addressing emerging challenges, and exploring new applications. The publication [5] provides an up-to-date overview of the field, as well as identifies several potential research directions, challenges, and opportunities for further research on OPC UA. An example of OPC UA usage in the marine industry is given in [6], where a control system based on the OPC UA for the requirements of the deep-sea dry recovery unit was designed and verified through prototype testing. In the study [7] the authors proposed the use of OPC UA to increase interoperability of communication and the utilization of Arrowhead Framework to enhance interoperable service compositions of control applications implemented in IEC 61499. The paper [8] presents an Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)-based cloud system designed for managing distributed

microgrid networks. The paper proposes a three-layer model specifically tailored to manage microgrids within cloud environments and defines an appropriate level of the information model for each layer. The research [9] demonstrates the mapping of the resource, device, and the system model to OPC UA and deals with the IEC 61499-based distributed control model that gaining popularity among the stakeholders involved in the field of cyber-physical production systems.

Purpose and task statement

The purpose of the study is to connect two automated control systems in the maritime industry into common distributed control system with application of the OPC UA technology.

Summary of the main material

The development of robust and efficient Distributed Automated Control Systems (DACS) requires powerful tools that facilitate seamless integration, modeling, and deployment. In this study, we have selected Simulink/MATLAB and CODESYS [10] as the primary platforms for the following reasons:

Simulink/MATLAB:

– Advanced Modeling and Simulation: Simulink provides a graphical environment for modeling and simulating dynamic systems, enabling the creation of complex control algorithms and the analysis of system behavior under various operating conditions. MATLAB offers a wide range of toolboxes for signal processing, control design, and optimization, which are essential for developing sophisticated control strategies.

– Rapid Prototyping and Testing: Simulink allows for rapid prototyping and testing of control systems, reducing the time and cost associated with traditional development methods. The ability to simulate systems in a virtual environment enables early detection and correction of design flaws, improving the overall reliability of the DACS.

– Code Generation and Hardware Integration: MATLAB Coder and Simulink Coder facilitate the automatic generation of C/C++ code from Simulink models, which can be deployed on a variety of hardware platforms. This capability simplifies the integration of control algorithms with real-world systems, including programmable logic controllers (PLCs) and embedded devices.

CODESYS:

– IEC 61131-3 Compliance: CODESYS is a comprehensive software platform that supports all five IEC 61131-3 programming languages, providing flexibility and interoperability for PLC programming. This standard ensures that control logic can be easily transferred between different hardware platforms, reducing vendor lock-in and simplifying system maintenance.

– Integrated Development Environment (IDE): CODESYS offers an intuitive IDE that streamlines the development, debugging, and deployment of PLC applications. The IDE includes powerful features such as online monitoring, debugging tools, and version control, which enhance the productivity of control engineers.

– Communication and Networking Capabilities: CODESYS supports a wide range of communication protocols, including OPC UA, EtherCAT, and Modbus, enabling seamless integration with other industrial devices and systems. This flexibility is crucial for building distributed control systems that require reliable data exchange and interoperability.

– SoftPLC Functionality: CODESYS SoftPLC enables the execution of PLC programs on standard PC hardware, providing a cost-effective and flexible alternative to traditional hardware PLCs. This capability facilitates the development of virtual control systems for simulation and testing purposes, as well as the deployment of control applications on edge devices and cloud platforms.

By combining the strengths of Simulink/MATLAB and CODESYS, we can effectively address the challenges associated with the development of DACS. Simulink/MATLAB provides a powerful environment for modeling, simulation, and code generation, while CODESYS offers a robust platform for PLC programming, communication, and deployment. This integrated approach enables the creation of highly efficient, reliable, and scalable distributed control systems.

OPC UA was integrated to facilitate the development of a distributed control architecture, bridging two distinct automated control systems. The first system, controlling the ship's diesel-electric propulsion plant, was built using Simulink/MATLAB at the equipment layer. This hierarchical control system accepts the desired propeller rotation speed as its primary input. System parameters are determined via mathematical modeling, utilizing classical and optimal control algorithms, to minimize energy losses. The output provides the objective function value, and all parameters are in per-unit (p.u.). A visual representation of the upper-level hierarchical control system for the ship's diesel-electric propulsion plant is shown in Figure 1.

Simulink's Industrial Communication Toolbox offers an OPC UA client, enabling connections to OPC UA servers. This client allows users to monitor server status, explore the server's data structure, read and write real-time data, and retrieve historical data. Historical data is presented as OPC data objects, facilitating analysis. The toolbox provides «OPC UA Read» and «OPC UA Write» blocks for seamless data exchange with OPC UA servers. It should be noted that OPC UA Read & Write blocks are presented since the newest Simulink version – R2024a.

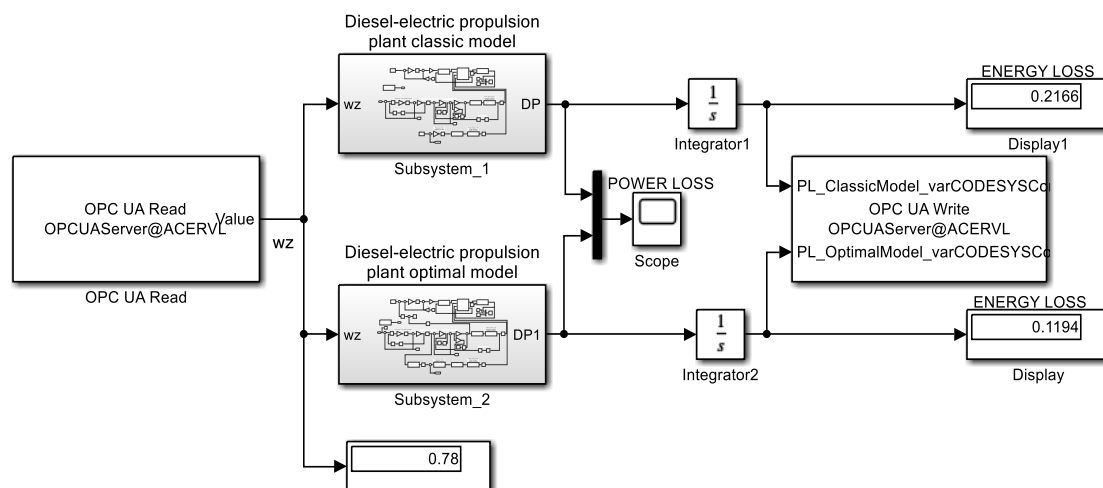


Fig. 1 – The Simulink/MATLAB block diagram illustrating the upper-level structure of the ship's diesel-electric propulsion plant's hierarchical control

To integrate live data from an OPC UA server into a Simulink model, the OPC UA Read block was used in the research. This block reads data from specified server nodes at a set rate, and then organizes that data into a Simulink bus signal. For more comprehensive data analysis, timestamps and quality statuses can be output separately. The block ensures that the data types read from the server are faithfully represented in Simulink, and timestamps are provided in either real or simulation time. The parameters for the OPC UA Read block, as utilized within this investigation, are depicted in Figure 2.

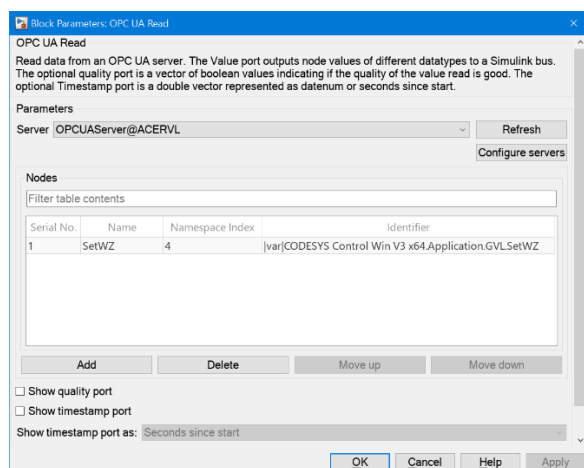


Fig. 2 – The OPC UA Read block parameters used in study

Parameter «Server» contains the OPC UA server name. OPC UA server connection is done via «Configure servers», which opens the «Configuration parameters window». OPC UA server parameters use in the study is shown in Fig. 3.

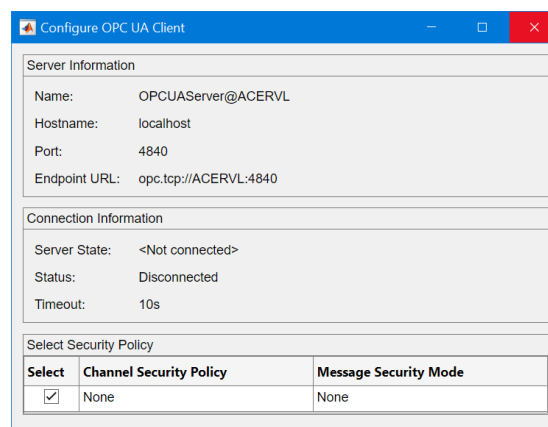


Fig. 3 – OPC UA server parameters

To enable data exchange between an OPC UA client and Simulink, using the OPC UA Read or Write blocks, configuration can be accomplished through two methods: either by adjusting *Model Settings* within the *Modeling* tab, or directly via the *Configure servers* option within the OPC UA Read or Write blocks. Figure 4 depicts configured OPC UA clients for the research model at the *OPC Configuration* pane.

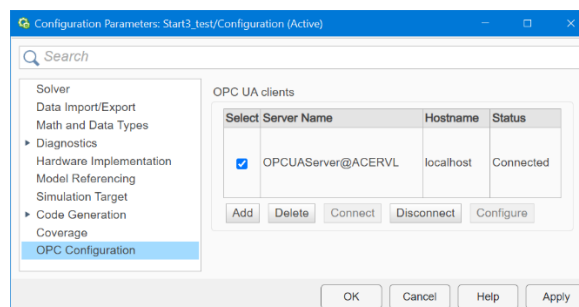


Fig. 4 – OPC UA Client Configuration

Adding an OPC UA Read or OPC UA Write block to a model automatically activates the OPC Configuration pane within the model's Configuration Parameters dialog box, which allows configuring an OPC UA client for a Simulink model.

In the study the desired propeller speed is configurable, either through direct operator input or via a CODESYS project functioning as a higher-level automated controller. To configure variables which is exported to control system in Simulink model, the two CODESYS project components was added in the research.

The first component «Global variable list» (GVL) is optional and creates the global variables to export in Simulink Model; local variables could be also exported. A global variable list is used for the declaration, editing, and display of global variables. The REAL type global variables SetWZ, PL_OptimalModel, PL_ClassicModel were added to the project developed in the study.

The second component «Symbol Configuration» is necessary for this research and was used to create a list of existed variables of the project and setup its access parameters, which was exported to the Simulink model editor (Fig. 5). The work described was performed using a new version of the automation platform with the latest service pack – CODESYS 3.5 SP20 for providing symbols to an OPC UA Server. To download necessary information to the controller the Support OPC UA features ☒ option was applied. The following information is necessary for operating the OPC UA Server: base types of inherited function blocks, contents of attributes that were assigned via compiler pragmas, and variable scopes (VAR_INPUT, VAR_OUTPUT, VAR_IN_OUT).

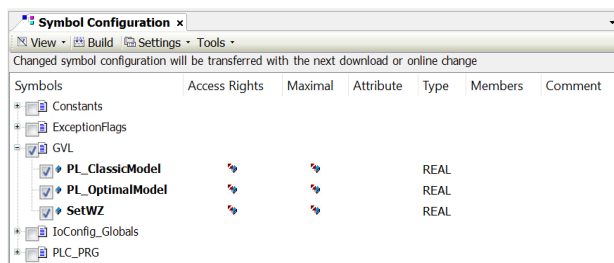


Fig. 5 – CODESYS Project Symbol Configuration

After «Symbol Configuration» had been added, the corresponding variables were added in the Simulink model by clicking the “Add” button in the OPC UA Read/Write block and the appropriate variables under DeviceSet/CODESYS Control Win V3 x64/Resources/Application/Global Vars/GVL node were selected (Fig. 6).

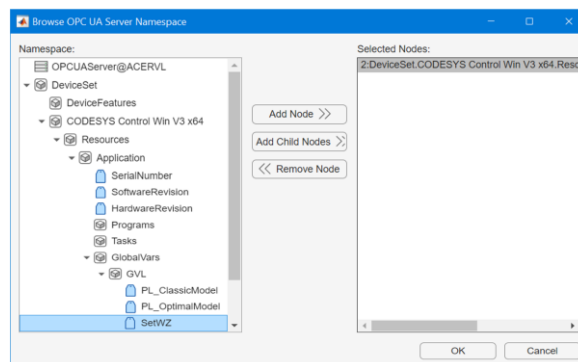


Fig. 6 – Variables selection in Simulink OPC UA Read/Write block namespace browser

Figure 7 illustrates the Human-Machine Interface (HMI) [11, 12] of the higher-level control system of this study, built on the CODESYS automation platform. This interface enables users to modify the desired propeller rotation speed of the ship. Special feature of the designed HMI is 'Donut Gauge' visual HTML5-based control element to monitor current set speed, which is the extension of the standard CODESYS visualization library.

The ship's desired propeller rotation speed is sent to a Simulink-based lower-level control system. Utilizing OPC UA, the resulting control objective function values – representing power loss under both classic and optimal control – are retrieved. These values, converted to energy losses, are then dynamically graphed in real time, allowing for the observation of energy savings in the main power plant.

The experimental setup utilized in this research was an Acer Aspire 5 laptop (Model: A515-44-R5QE) as the central processing unit and data acquisition system. The laptop specifications are as follows:

- Processor: AMD Ryzen 4500U @ 2.3-4.0GHz
- Memory: 8GB DDR4 RAM
- Storage: 256GB NVMe SSD
- Operating System: Windows 10 Pro

The AMD Ryzen 4500U processor provided sufficient computational resources for data processing and analysis, while the 8GB of RAM allowed for efficient multi-tasking. The NVMe SSD ensured fast data access and system responsiveness. At this experimental setup, the distributed control system has low latency up to 20 ms. In the conditions of scaling of the studied distributed control system within the local network of the Ethernet TCP/IP 1Gbs standard, the delay value estimate will be up to 25 ms, which is acceptable for real-time systems. Monitoring of the system developed in this study over a sufficient period of time (more than 24 hours) revealed no problems in data exchange between subsystems, which shows its sufficient reliability.

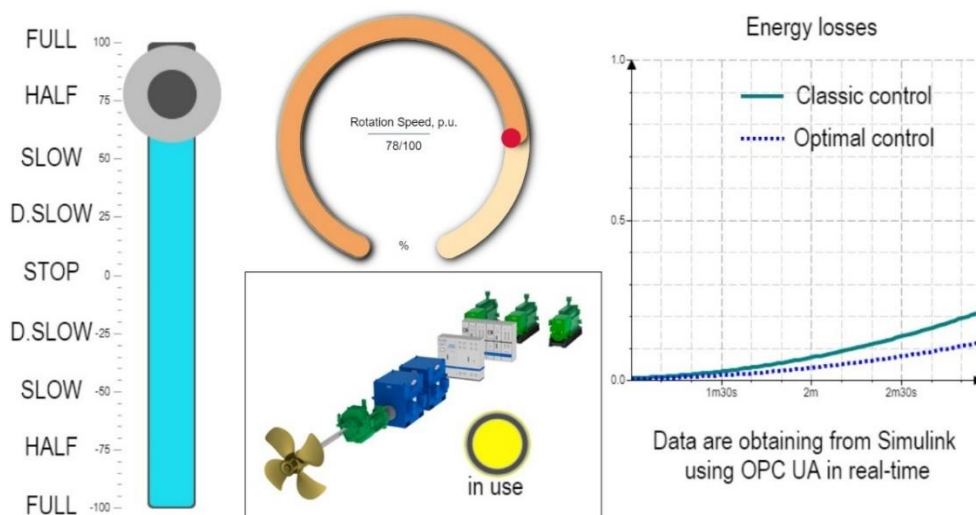


Fig. 7 – The HMI interface for the upper-level control system, developed within the CODESYS automation environment

Conclusions

This research has successfully demonstrated the feasibility and efficiency of integrating two different ship automated control systems through the implementation of OPC UA. The findings confirm the assumption that OPC UA provides a robust and standardized framework for achieving seamless, real-time interoperability between heterogeneous automation platforms, a critical prerequisite for the development of advanced distributed control systems in maritime environments. Specifically, the study has shown that:

1. The implementation of OPC UA facilitated the consistent and low-latency exchange of critical operational data between the integrated systems, ensuring synchronized and responsive control actions. This is essential for maintaining operational safety and efficiency in dynamic maritime scenarios.

2. Enhanced System Interoperability: The adoption of a platform-independent communication protocol like OPC UA significantly reduced the complexities associated with integrating systems from different vendors, thereby promoting greater flexibility and scalability in maritime automation design.

3. The architecture developed in this research, leveraging OPC UA's inherent security and redundancy features, contributes to the enhanced resilience of ship control systems. This is vital for mitigating the risks associated with system failures and ensuring uninterrupted operation in demanding conditions.

4. The successful integration achieved in this study lays a foundation for the implementation of more sophisticated automation functionalities, such as predictive maintenance, remote diagnostics, and autonomous navigation, which are increasingly relevant in the evolution of maritime technology.

5. This research underscores the importance of adopting open standards like OPC UA in maritime automation,

fostering a more unified and interoperable ecosystem. Future work should focus on exploring the scalability of this approach for larger and more complex ship systems, as well as investigating the integration of emerging technologies such as artificial intelligence and machine learning within the OPC UA framework.

References

- [1] X. Ge, F. Yang, and Q.-L. Han, «Distributed networked control systems: A brief overview», *Information Sciences*, vol. 380, pp. 117-131, 2017. doi: **10.1016/j.ins.2015.07.047**.
- [2] O. Polyvoda, D. Lytvynchuk, and V. Polyvoda, «Monitoring Subsystem Design Method in the Information Control System», in Proceedings of the XV International Scientific Conference «Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence» (ISDMCI'2019), Ukraine, 2019, vol. 1020, pp. 294-303. doi: **10.1007/978-3-030-26474-1_21**.
- [3] X. Luo, «Research on Communication Technology of Ship Integrated Monitoring System Based on OPC», in Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Vientiane, Laos, 2020, pp. 528-531. doi: **10.1109/ICITBS49701.2020.00115**.
- [4] OPC Foundation. Unified Architecture. [Online]. Available: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>. Accessed on: February 4, 2025.
- [5] J. T. Da Silva, A. L. Dias, and I. N. Da Silva, «A Survey on OPC UA Protocol: Overview, Challenges and Opportunities», in Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Bernardo do Campo, Brazil, 2023, pp. 1523-1530. doi: **10.1109/INDUSCON58041.2023.10375053**.

- [6] M. Yang, J. Zhang, Y. Lei, and G. Sheng, «Design and Implementation of Control System for Deep-Sea Dry Recovery Unit Based on OPC UA», in Proceedings of the IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, 2023, pp. 905-909. doi: [10.1109/ITAIC58329.2023.10408815](https://doi.org/10.1109/ITAIC58329.2023.10408815).
- [7] A. Tripathy, J. Van Deventer, C. Paniagua, and J. Delsing, «OPC UA Service Discovery and Binding in a Service-Oriented Architecture», in Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), Coventry, United Kingdom, 2022, pp. 1-7. doi: [10.1109/ICPS51978.2022.9816880](https://doi.org/10.1109/ICPS51978.2022.9816880).
- [8] A. Suryani, I. Sulaeman, O. A. Rosyid, N. Moonen, and J. Popović, «Interoperability in Microgrids to Improve Energy Access: A Systematic Review», IEEE Access, vol. 12, pp. 64267-64284, 2024. doi: [10.1109/ACCESS.2024.3396275](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396275).
- [9] M. Majumder, B. Wiesmayr, and A. Zoitl, «Extending the OPC UA Companion Specification for an IEC 61499-based Control System», in Proceedings of the IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sinaia, Romania, 2023, pp. 1-4. doi: [10.1109/ETFA54631.2023.10275677](https://doi.org/10.1109/ETFA54631.2023.10275677).
- [10] V.V. Polyvoda, and O.V. Polyvoda, *Proektuvannia system avtomatyzatsii na platformi CODESYS: navch. posib.* [Design of automation systems on the CODESYS platform: study guide]. Kherson, Ukraine: KSMA Editing and Publishing Department. (Ukr.).
- [11] V. Polyvoda, O. Polyvoda, «Engineering of Virtual Training Simulators Using CODESYS Automation Platform», in Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Development of social and engineering innovation in maritime education and training to ensure shipping safety», Klaipeda, Lithuanian Maritime Academy, 2023, pp. 93-97.
- [12] S. Savchenko, V. Polyvoda, «Modeling of the ship boiler automated control system», in Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference SEUTTOO-2024: Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance, Kherson, 2024, pp. 263-265.

ПРОЄКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СУДНОВИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ OPC UA

Поливода В.В.

канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7742-255X>, e-mail: polyvodavv@gmail.com;

Поливода О.В.

канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6323-3739>, e-mail: pov81@ukr.net

Стаття досліджує застосування технології OPC Unified Architecture (OPC UA) у розробці розподілених автоматизованих систем керування (АСК) на морських судах. OPC UA є відкритим стандартом, що забезпечує безпечний та масштабований обмін даними між різноманітними промисловими пристроями. Впровадження OPC UA в морській галузі відкриває нові можливості для оптимізації роботи суден, підвищення надійності та зменшення витрат на обслуговування. Завдяки OPC UA можна об'єднати в єдину систему різні датчики, виконавчі механізми, контролери та інші технічні засоби судна, що дозволяє збирати та аналізувати дані в реальному часі. Це, в свою чергу, дає змогу здійснювати дистанційний моніторинг та керування суднами, а також виконувати проактивне технічне обслуговування. До основних переваг використання OPC UA в морській галузі відносять: міжплатформність: забезпечує сумісність різних виробників обладнання; безпека: надійний захист даних завдяки різним механізмам шифрування та аутентифікації; масштабованість: адаптація до систем різного розміру та складності; інтеграція: спрощує об'єднання різних систем автоматизації; надійність: гарантує безперебійну роботу в складних умовах морського середовища. Одним із ключових переваг технології OPC UA є її здатність до інформаційного моделювання, що дозволяє створювати стандартизовані моделі даних для опису фізичних компонентів та процесів на судні. Це спрощує процес проектування та впровадження АСК, зменшуючи ризик помилок. Крім технічних переваг, OPC UA також має економічні переваги. Завдяки спрощенню інтеграції та обслуговування систем, OPC UA може знизити загальну вартість володіння для суднобудівних компаній та судновласників. Крім того, підвищуючи ефективність та надійність експлуатації суден, OPC UA сприяє збільшенню прибутковості. Таким чином, впровадження технології OPC UA в морській галузі є перспективним напрямком розвитку, який дозволяє підвищити рівень автоматизації та інтеграції систем на судах, забезпечити безпеку та ефективність їхньої експлуатації.

Ключові слова: OPC UA, розподілені автоматизовані системи керування, морська галузь.

Перелік використаних джерел

- [1] Ge X., Yang F., Han Q. Distributed networked control systems: A brief overview. *Information Sciences*. 2017. Vol. 380. 2017. Pp. 117-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.07.047>.
- [2] Polyvoda O., Lytvynchuk D., Polyvoda V. Monitoring Subsystem Design Method in the Information Control System. *Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence (ISDMCI'2019)*: Proceedings of the XV Int. Scientific Conference, Zaliznyi Port, Ukraine, 21-25 May 2019. Pp. 294-303. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_21.
- [3] Luo X. Research on Communication Technology of Ship Integrated Monitoring System Based on OPC. *International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, Vientiane, Laos, 11-12 January 2020. Pp. 528-531. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00115>.
- [4] OPC Foundation. Unified Architecture. URL: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (дата звернення: 04.02.2025).
- [5] Da Silva J.T., Dias A.L., Da Silva I.N. A Survey on OPC UA Protocol: Overview, Challenges and Opportunities. *15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Bernardo do Campo, Brazil, 22-24 November 2023. Pp. 1523-1530. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10375053>.
- [6] Design and Implementation of Control System for Deep-Sea Dry Recovery Unit Based on OPC UA / Yang M., Zhang J., Lei Y., Sheng G. *IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, Chongqing, China, 8-10 December 2023. Pp. 905-909. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITAIC58329.2023.10408815>.
- [7] OPC UA Service Discovery and Binding in a Service-Oriented Architecture / Tripathy A., Van Deventer J., Paniagua C., Delsing J. *IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, Coventry, United Kingdom, 24-26 May 2022. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPS51978.2022.9816880>.
- [8] Interoperability in Microgrids to Improve Energy Access: A Systematic Review / A. Suryani et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 64267-64284. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396275>.
- [9] Majumder M., Wiesmayr B., Zoitl A. Extending the OPC UA Companion Specification for an IEC 61499-based Control System. *IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania, 12-15 September 2023. Pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ETFA54631.2023.10275677>.
- [10] Поливода В.В., Поливода О.В. Проектування систем автоматизації на платформі CODESYS: навч. посіб. Херсон : ХДМА, 2023. 248 с.
- [11] Polyvoda V., Polyvoda O. Engineering of Virtual Training Simulators Using CODESYS Automation Platform. *Development of social and engineering innovation in maritime education and training to ensure shipping safety*: Proceedings of the Int. Scientific-Practical Conference, Klaipeda, Lithuania, 23 March 2023. Pp. 93-97.
- [12] Savchenko S., Polyvoda V. Modeling of the ship boiler automated control system. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, Україна, 13-15 березня 2024 р. Херсон: ХДМА, 2024. С. 263-265.

Стаття надійшла 04.02.2025

Стаття прийнята 24.03.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Polyvoda V.V., Polyvoda O.V. Design of distributed automated ship's control systems based on OPC UA technology. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 174-181. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336333>.

БАГАТОФАКТОРНИЙ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ УСПІШНОСТІ ЗАМОВЛЕНЬ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕСУРСАМИ

Мірошниченко С.О. студент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4868-3006>, e-mail: serhii.miroshnychenko@mipolytech.eduication;

Вовна О.В. д-р техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4433-7097>, e-mail: oleksandr.vovna@mipolytech.eduication

У статті розглянуто методологію багатофакторного статистичного аналізу для прогнозування успішності замовлень у B2B-сегменті як інструмент оптимізації автоматизованих систем керування ресурсами підприємства. Дослідження зосереджено на виявленні ключових факторів, що впливають на успішність замовлень, та розробці методології, яка автоматично адаптується до характеру розподілу даних, обираючи відповідні статистичні тести та методи аналізу. Представлено комплексний підхід, який включає статистичний аналіз історичних даних ERP-систем, побудову прогностичних моделей та їх інтеграцію в автоматизовані системи керування ресурсами підприємства. Запропонована методологія дозволяє підвищити точність прогнозування успішності замовлень, оптимізувати управління запасами та виробничими процесами, а також покращити якість прийняття управлінських рішень. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування методології для підвищення ефективності використання ресурсів підприємства та зниження операційних ризиків.

Ключові слова: багатофакторний аналіз, статистичне прогнозування, успішність замовлень, B2B-сегмент, автоматизовані системи керування ресурсами, ERP-системи, оптимізація бізнес-процесів.

Постановка проблеми

Ефективне керування ресурсами підприємства залишається однією з ключових проблем сучасного бізнесу [1]. При автоматизації цього процесу одним з найважливіших питань є контроль поточної та прогнозування майбутньої кількості продукції на складах [2], що дозволяє своєчасно виготовляти продукцію та, за необхідності, закупати компоненти для забезпечення виробничого процесу [3]. Основним підходом до прогнозування майбутньої кількості продукції є моніторинг динаміки замовлень на відповідні товари та аналіз їх відпуску зі складських приміщень. Для оперативного реагування на створені, але ще не погоджені, замовлення постає задача прогнозування їхньої успішності, спираючись на історичні дані системи планування ресурсів підприємства (ERP) [4].

Багатофакторний статистичний аналіз є потужним інструментом, який дозволяє виявляти приховані взаємозв'язки між різними характеристиками замовлень та їхньою кінцевою успішністю. Це дає можливість розробити моделі прогнозування, що допомагають оптимізувати бізнес-процеси та підвищити ефективність використання ресурсів підприємства [5], [6]. У контексті B2B-сегмента прогнозування успішності замовлень набуває критичного значення внаслідок підвищеної вартості транзакцій та стратегічної важливості довгострокових партнерських відносин. Аналіз історичних даних замовлень дозволяє виявити фактори, що впливають на ймовірність успішного виконання замовлення, що, в свою чергу, дає можливість проактивно управляти ризиками та ресурсами підприємства [7], [8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження в області прогнозування успішності бізнес-операцій та оптимізації ресурсів підприємства викликають значний інтерес як в академічному середовищі, так і в практичній сфері [9], [10]. Зокрема, автори [1] досліджували вплив застосування ERP на раціональне використання ресурсів компанії та на основі даних ERP для різних типів операційних моделей компанії виділили фактори раціонального використання ресурсів. У роботі підкреслено, що системна інтеграція сприяє оптимізації використання ресурсів через автоматизацію рутинних бізнес-процесів. Дослідження [11] продемонструвало, що імплементація систем планування ресурсів підприємства позитивно корелює з розширенням інтеграції постачальників, оптимізацією внутрішньої інтеграції та впровадженням екологічно орієнтованих практик управління ланцюгами постачання. Емпіричні результати, отримані зазначеними дослідниками, підтверджують гіпотезу про те, що дані технологічні рішення сприяють підвищенню операційної ефективності підприємств. Автори [12] провели аналіз історії, особливостей та критичних факторів успіху впровадження ERP в епоху Industry 4.0, визначивши ключові ознаки, серед яких підтримка топменеджменту, проєктна команда, IT-інфраструктура, комунікація, кваліфіковані співробітники, навчання та моніторинг.

У роботі [8] досліджено підвищення гнучкості та стійкості ланцюгів постачання за допомогою машинного навчання з фокусуванням на методах оптимізації для логістики та управління запасами. Автор продемонстрував, що застосування моделей машинного навчання дозволило значно покращити точність

прогнозування попиту та оптимізувати рівні запасів. Порівняння статистичних та методів машинного навчання для часових рядів у логістиці проводили автори [5], які виявили, що методи машинного навчання, такі як нейронні мережі та Random Forests, часто перевершують традиційні моделі часових рядів у точності прогнозування. Однак вони також відзначають, що статистичні методи залишаються актуальними через їхню інтерпретованість та ефективність в певних умовах. Застосування методів машинного навчання для прогнозування успіху стартапів досліджували в роботі [9], де автори порівняли три алгоритми машинного навчання: логістичну регресію, дерево рішень та Random Forest. Попри обмежені дані, вони отримали прийнятні результати з точки зору точності, чутливості та F-міри, а найкращою моделлю виявилось дерево рішень. Автори [13] вивчали вплив даних про роботу з відеоматеріалами на точність моделей прогнозування успішності студентів. Автори використовували алгоритми Naive Bayes, логістичної регресії, Random Forest та нейронних мереж і виявили, що включення даних про перегляд відео підвищило точність моделей на 10%, а найвищу точність прогнозування досягли моделі, побудовані з використанням алгоритмів Random Forest (87,1%) та нейронних мереж (85,3%). Дослідження [10] оцінює ефективність різних алгоритмів машинного навчання у прогнозуванні успіху стартапів та досліджує покращення продуктивності, досягнуте шляхом застосування методу головних компонент (PCA) до моделей. Зокрема, Support Vector Classifier показав значне підвищення продуктивності при використанні з PCA, фіксуючи точність 0,90, що демонструє важливість зменшення розмірності даних для підвищення точності предиктивних моделей.

Аналіз наявних досліджень свідчить про високий потенціал методів машинного навчання для прогнозування в бізнес-контексті, однак також підкреслює необхідність розуміння базових статистичних властивостей даних. Попри значний прогрес у розвитку методологічного апарату прогнозування та оптимізації ресурсного забезпечення організацій, виявлено низку концептуальних і методологічних проблем, які потребують поглибленого наукового дослідження та системного методологічного вирішення. Також існує потреба в більш ґрунтовному дослідженні специфічних факторів, що впливають на успішність замовлень у B2B-сегменті [14]. Цей ринковий сектор характеризується унікальними особливостями, такими як складність процесу прийняття рішень, важливість довгострокових партнерських відносин та необхідність індивідуального підходу до кожного клієнта. Водночас актуальною є розробка методологічного підходу, який враховуватиме характеристики розподілу даних при виборі аналітичних методів, оскільки автоматичний відбір відповідних статистичних тестів залежно від властивостей емпіричних даних є критичним для підвищення предиктивної точності. Дослідження у сфері прогнозування B2B-продажів підтверджують складність цього

завдання та необхідність врахування специфічних факторів. Наприклад, дослідження, проведене на даних компанії зі списку Fortune 500, показало, що найточніша предиктивна модель досягла точності лише 80%, що свідчить про наявність значного потенціалу для вдосконалення [14]. Крім того, більшість досліджень зосереджується на загальних методах прогнозування попиту та управління запасами, без врахування специфіки B2B-сегмента та особливостей прогнозування успішності окремих замовлень [7]. Також багато дослідників для прогнозування бізнес-показників використовують готові методи машинного навчання без детального статистичного аналізу властивостей даних [9], [10]. Це може призводити до неоптимального вибору методів аналізу та, як наслідок, до неточних прогнозів.

Результати проведеного аналізу досліджень та публікацій демонструють наявність потреби в розробці методології, яка б автоматично адаптувалася до характеру розподілу даних, обираючи відповідні статистичні тести та методи аналізу. Такий підхід дозволив би підвищити точність прогнозування в умовах різномірних даних, що характерні для реальних бізнес-процесів [15]. Представлені дослідження також часто не приділяють достатньої уваги інтерпретації результатів статистичного аналізу та їх практичному застосуванню для оптимізації автоматизованих систем керування ресурсами. Розуміння значущості різних факторів та їх впливу на успішність замовлень має критичне значення для прийняття обґрунтованих управлінських рішень [4]. Також варто зазначити, що у більшості досліджень відсутній комплексний підхід до прогнозування успішності замовлень, який поєднуватиме статистичний аналіз з інтеграцією результатів у ERP-системи та інші платформи автоматизації підприємства [16]. Реалізація такого підходу забезпечить оптимальне використання аналітичних результатів для вдосконалення бізнес-процесів [2].

Таким чином, актуальною є розробка комплексної методології багатофакторного статистичного аналізу успішності замовлень, яка враховуватиме особливості B2B-сектора, автоматично адаптуватиметься до характеристик розподілу даних та забезпечуватиме інтеграцію результатів у корпоративні інформаційні системи.

Мета статті

Мета цього дослідження полягає у розробці та науковому обґрунтуванні методології багатофакторного статистичного аналізу для прогнозування успішності замовлень у B2B-сегменті з метою оптимізації автоматизованих систем керування ресурсами підприємства.

Для досягнення цієї мети визначено наступні завдання дослідження:

1. Розробити методологію статистичного аналізу, яка враховує специфіку розподілу досліджуваних даних та забезпечує адекватний вибір статистичних методів і критеріїв оцінювання.

2. Провести багатфакторний статистичний аналіз історичних даних замовлень для виявлення факторів, що впливають на їхню успішність.

3. Розробити статистичну модель прогнозування успішності замовлень на основі виявлених значущих факторів.

4. Провести валідацію розробленої статистичної моделі та оцінити її прогностичну ефективність з визначенням найбільш впливових факторів успішності замовлень.

5. Розробити рекомендації щодо інтеграції результатів статистичного аналізу в автоматизовані системи керування ресурсами підприємства та визначити напрями подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу

У цій роботі авторами розроблено статистичну модель для прогнозування успішності замовлень на основі порівняльних статистичних тестів, що автоматично обирає методи аналізу та визначає статистичну значущість факторів, які впливають на результат. Методологія охоплює кілька етапів: завантаження та підготовку даних, обробку викидів, розподіл даних на тренувальну та тестову вибірки, оцінку нормальності розподілу даних, вибір відповідного статистичного тесту для аналізу значущості ознак, навчання моделі, прогнозування та оцінку її ефективності. Вихідний набір даних включає 86 794 записів, що містять інформацію про замовлення з 19 характеристиками (ознаками). Цільова змінна характеризує успішність замовлення – дорівнює 1 у випадку схваленого та успішного виконання або 0 в іншому випадку.

Початковий етап передбачає збір історичних даних, після чого здійснюється ретельна перевірка та обробка пропущених значень шляхом заповнення медіаною відповідного стовпця, що є робастним підходом, стійким до викидів [17]. З метою забезпечення логічної консистентності масиву даних здійснюється корекція від'ємних значень шляхом їх заміни нульовими значеннями для тих параметрів, де негативні величини не мають змістовної інтерпретації в контексті фізичних або економічних процесів [18], [19], а також виявлення та обробка викидів методом міжквартильного розмаху (IQR) із порогом 1,5 [20], після чого значення обмежуються граничними межами (вінсоризація), що дозволяє зберегти всі спостереження, мінімізуючи вплив екстремальних величин [21]. Дані розподіляються на тренувальну та тестову вибірки у співвідношенні 70:30 із застосуванням стратифікованого розбиття для збереження пропорцій цільової змінної [22].

Ключовим елементом розробленої методології є систематичний аналіз характеру розподілу досліджуваних даних та науково обґрунтований вибір відповідного статистичного інструментарію. Оцінка нормальності розподілу проводиться для кожної числової ознаки окремо в групах успішних і неуспішних замовлень за допомогою трьох тестів: Shapiro-Wilk [23],

D'Agostino-Pearson [24] та Anderson-Darling [25]. Висновки про нормальність статистичного розподілу ознаки приймається за умови підтвердження цієї гіпотези принаймні двома з трьох застосованих тестів. На основі результатів оцінки нормальності обирається статистичний тест для аналізу значущості ознак. Для нормально розподілених даних застосовується Welch's t-test [26], а розмір ефекту обчислюється за Cohen's d [27]. У разі ненормального розподілу використовується непараметричний тест Mann-Whitney [28], де розмір ефекту оцінюється через площу під ROC-кривою (AUC) [29].

Навчання розробленої моделі включає три етапи: (1) відбір статистично значущих ознак ($p \leq 0,05$), (2) розрахунок порогових значень та (3) визначення ваг ознак. Порогові значення обчислюються як середнє арифметичне між центральними тенденціями груп успішних і неуспішних замовлень, де використовуються середні значення за нормального розподілу або медіани за ненормального розподілу. Для кожної ознаки також визначається напрямок впливу та відповідна вага. Для параметричного тесту вага визначається як $w = 0,5 + 0,5 \times \tanh\left(\frac{\text{Cohen's } d}{2}\right)$, а для непараметричного як $w = 2 \times |AUC - 0,5|$, якщо $AUC \geq 0,5$, інакше 0. Ця процедура дозволяє уніфікувати розміри ефекту в межах інтервалу [0; 1], що забезпечує порівнянність результатів незалежно від обраного статистичного методу. Прогнозування здійснюється шляхом обчислення «голосу» кожної значущої ознаки для спостереження: голос дорівнює вазі ознаки, якщо значення перевищує (або не перевищує) поріг залежно від напрямку впливу, інакше 0. Сумарний голос нормалізується до ймовірності успішності, а прогнозований клас визначається як 1, якщо ймовірність перевищує 0,5, інакше 0.

Прогнозована ймовірність успішності обчислюється за наступною формулою:

$$p = \frac{1}{|\mathcal{F}|} \sum_{f \in \mathcal{F}} \frac{w_f}{W} \cdot \frac{1 + \text{sgn}((x_f - \theta_f) \cdot d_f)}{2},$$

де p – прогнозована ймовірність успішності; $\mathcal{F}$ – множина значущих ознак; $|\mathcal{F}|$ – кількість ознак у множині $\mathcal{F}$; w_f – вага ознаки $f \in \mathcal{F}$; W – сумарна вага всіх ознак, $W = \sum_{f \in \mathcal{F}} w_f$; x_f – значення ознаки f для спостереження; θ_f – порогове значення для ознаки f ; d_f – напрямок впливу ознаки ($d_f = +1$, якщо більші значення асоціюються з успішністю, інакше $d_f = -1$); $\text{sgn}()$ – функція, яка приймає значення 1 для додатних аргументів, -1 для від'ємних та 0 для нульових.

Ця методологія забезпечує структурований підхід до аналізу даних і прогнозування, що дозволяє ідентифікувати ключові фактори успішності замовлень із високою статистичною достовірністю. Оцінка ефективності розробленої моделі включає розрахунок

комплексу метрик [30]: точність, збалансована точність, влучність, повнота, F1-score, ROC AUC та специфічність.

У результаті статистичного аналізу вхідного масиву даних було виявлено 17 статистично значущих ознак із 19 досліджуваних. Для кожної значущої ознаки було розраховано вагу (важливість) на основі розміру ефекту та визначено порогове значення для прийняття рішення. В табл. 1 наведено інформацію результатів аналізу для статистично значущих ознак. Варто зазначити, що для більшості досліджуваних факторів було встановлено позитивний напрямок впливу (+1), за

винятком змінних `hour_of_day` та `partner_avg_amount`, для яких виявлено негативний вплив (-1).

Результати аналізу демонструють, що комунікаційні фактори (кількість повідомлень) та показники попереднього досвіду співпраці з партнером (рівень успішності партнера) виявляють найбільш виражений детермінантний вплив на успішність замовлень. Це підтверджує важливість якісної комунікації та довготривалих партнерських відносин у B2B-сегменті.

Для кращого розуміння характеру впливу найбільш та найменш значущих ознак, було проведено порівняльний аналіз їх статистичних показників у групах успішних та неуспішних замовлень (табл. 2).

Таблиця 1

Ваги та порогові значення значущих ознак замовлень

Ознака	Порогове значення	Вага (важливість)
Кількість повідомлень в замовленні (<code>order_messages</code>)	7,00	0,5421
Відсоток успішних замовлень у клієнта (<code>partner_success_rate</code>)	62,10	0,3956
Кількість змін в замовленні (<code>order_changes</code>)	2,50	0,2828
Загальна кількість повідомлень клієнта (<code>partner_total_messages</code>)	224,50	0,1861
Загальна кількість замовлень клієнта (<code>partner_total_orders</code>)	24,50	0,1777
Кількість позицій в замовленні (<code>order_lines_count</code>)	2,50	0,1666
Строк співпраці з клієнтом в днях (<code>partner_order_age_days</code>)	736,00	0,1564
Середня кількість змін в замовленнях у клієнта (<code>partner_avg_changes</code>)	3,89	0,1436
Середня сума в успішних замовленнях клієнта (<code>partner_success_avg_amount</code>)	904,14	0,1307
Сума замовлення (<code>order_amount</code>)	512,88	0,1179
Середня кількість повідомлень в неуспішних замовленнях клієнта (<code>partner_fail_avg_messages</code>)	5,62	0,0871
Середня кількість змін в успішних замовленнях клієнта (<code>partner_success_avg_changes</code>)	4,29	0,0856
Середня кількість змін в неуспішних замовленнях клієнта (<code>partner_fail_avg_changes</code>)	2,93	0,0777
Година дня, коли зроблено замовлення (<code>hour of day</code>)	11,00	0,0767
Середня кількість повідомлень в успішних замовленнях клієнта (<code>partner_success_avg_messages</code>)	9,44	0,0645
Середня сума в замовленнях клієнта (<code>partner_avg_amount</code>)	1127,29	0,0364
Квартал року, коли зроблено замовлення (<code>quarter</code>)	2,50	0,0182

Таблиця 2

Порівняння статистичних показників найбільш та найменш впливових ознак

Ознака	Середнє		Медіана	
	неуспішні	успішні	неуспішні	успішні
<code>order_messages</code>	6,09	10,08	5,00	9,00
<code>partner_success_rate</code>	45,90	67,46	50,00	74,20
<code>order_changes</code>	2,71	3,74	2,00	3,00
<code>partner_success_avg_messages</code>	8,71	9,70	9,48	9,50
<code>partner_avg_amount</code>	1835,28	1745,37	1133,22	1121,35
<code>quarter</code>	2,46	2,49	2,00	3,00

Статистичний аналіз даних, представлених у Таблиці 2, свідчить про наявність статистично значущих відмінностей у показниках центральної тенденції (середніх арифметичних та медіанних значеннях) найвпливовіших предикторів між групами успішних та неуспішних замовлень. Наприклад, середня кількість повідомлень в успішних замовленнях (10,08) перевищує цей показник для неуспішних замовлень (6,09) в 1,77 рази.

Для оцінки ефективності розробленої статистичної моделі було проведено тестування на незалежній тестовій вибірці (30% початкових даних, 26039 замовлень). Результати оцінки представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати оцінки якості статистичної моделі

Метрика	Значення	Інтерпретація
Точність (Accuracy)	0,6557	Частка правильно класифікованих замовлень
Збалансована точність (Balanced Accuracy)	0,6582	Середнє арифметичне чутливості та специфічності
Влучність (Precision)	0,7694	Частка дійсно успішних серед передбачених як успішні
Повнота (Recall)	0,6489	Частка виявлених успішних замовлень
F1-міра	0,7040	Гармонічне середнє точності та повноти
ROC AUC	0,7224	Площа під ROC-кривою, якість класифікації
Специфічність (Specificity)	0,6675	Частка правильно ідентифікованих неуспішних

Емпіричні результати засвідчують, що розроблена модель демонструє загальну точність класифікації 65,57%, що відповідає задовільному рівню ефективності для завдань прогнозування економічних індикаторів у бізнес-середовищі [6]. Збалансована точність (65,82%) свідчить про рівномірну ефективність моделі для обох класів (успішні та неуспішні замовлення) [31]. Влучність 76,94% означає, що серед замовлень, які модель класифікує як успішні, близько 77% дійсно є успішними [32]. Це важливий показник для бізнесу, оскільки дозволяє ефективно розподіляти ресурси, концентруючись на замовленнях з високою ймовірністю успіху.

Значення ROC AUC 0,7224 вказує на здатність моделі розрізняти успішні та неуспішні замовлення з точністю, що на 22,24% перевищує випадкове передбачення [33], [34]. Згідно з інтерпретацією AUC [35], значення в діапазоні 0,7-0,8 свідчить про задовільну якість моделі.

Розподіл прогнозованих ймовірностей за фактичними класами, що наведено на рис. 1, показує, що модель здатна розділяти успішні та неуспішні замовлення, хоча існує значна область перекриття, де ймовірності коливаються в діапазоні від 0,3 до 0,7. Це свідчить про складність задачі прогнозування успішності замовлень та необхідність подальшого вдосконалення моделі.

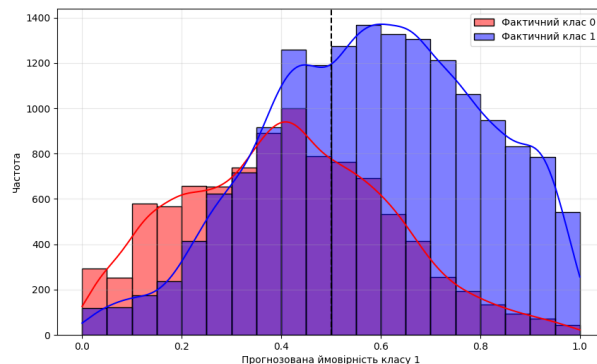


Рис. 1 – Розподіл прогнозованих ймовірностей за фактичними класами

Аналіз матриці помилок показує, що модель правильно ідентифікувала 6415 неуспішних та 10660 успішних замовлень, при цьому 3195 неуспішних були помилково класифіковані як успішні, а 5769 успішних – як неуспішні. Це вказує на потенціал для подальшого вдосконалення моделі.

Висновки

Розроблено та емпірично верифіковано методологію багатофакторного статистичного аналізу для прогнозування успішності замовлень у B2B-сегменті як інструмент оптимізації автоматизованих систем керування ресурсами підприємства.

Методологія автоматичного вибору статистичних тестів забезпечила надійний аналіз гетерогенних бізнес-даних. Виявлено сімнадцять статистично значущих предикторів успішності замовлень, найвагоміші з яких: кількість повідомлень (0,5421), рівень успішності партнера (0,3956) та кількість змін (0,2828).

Розроблена модель прогнозування продемонструвала показники: точність 65,57%, влучність 76,94%, ROC AUC 0,7224, підтвердивши визначальний вплив комунікаційних факторів та попереднього досвіду співпраці на успішність замовлень.

Значущість дослідження полягає у формуванні концептуально-методологічного апарату статистичного прогнозування бізнес-процесів. Практичне застосування включає оптимізацію складських запасів, пріоритезацію замовлень та стратегічне планування партнерських відносин.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на впровадження методів машинного навчання, зокрема алгоритмів Random Forest та нейронних мереж, що

дозволить підвищити точність прогнозування та ефективність аналітичних процедур. Особливу увагу варто приділити розробці гібридних моделей, які поєднують традиційні методи статистичного аналізу з сучасними підходами машинного навчання, компенсуючи обмеження кожного з методів окремо. Не менш важливим є дослідження динамічних аспектів функціонування системи та впровадження механізмів автоматичної адаптації моделі до змінних умов середовища, що забезпечить стабільність та надійність отриманих результатів у довгостроковій перспективі.

Дослідження демонструє значний потенціал статистичних методів для оптимізації систем керування ресурсами підприємства та окреслює перспективи інтеграції з сучасними методами аналізу даних.

Перелік використаних джерел

- [1] Markuts V., Kyzenko O. ERP system as a tool for ensuring the rational use of company resources. *Scientific notes*. 2023. No. 32. Pp. 68-78. DOI: https://doi.org/10.33111/vz_kneu.32.23.03.06.045.05_1.
- [2] Qureshi M.R.N.M. Evaluating Enterprise Resource Planning (ERP) Implementation for Sustainable Supply Chain Management. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 22. Article 14779. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214779>.
- [3] Enterprise Resource Planning Systems for Health, Safety, and Environment Management: Analyzing Critical Success Factors / M. AlMarri et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 7. Article 2947. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17072947>.
- [4] AI-driven demand forecasting: Enhancing inventory management and customer satisfaction / Olamide Raimat Amosu et al. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 23, no. 2. Pp. 708-719. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2394>.
- [5] Comparing Statistical and Machine Learning Methods for Time Series Forecasting in Data-Driven Logistics—A Simulation Study / L. Schmid et al. *Entropy*. 2024. Vol. 27, no. 1. Article 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/e27010025>.
- [6] Statistical Predictions of Trading Strategies in Electronic Markets / Á. Cartea et al. *Journal of Financial Econometrics*. 2024. Vol. 23, iss. 2. Pp. 1-64. DOI: <https://doi.org/10.1093/jjfinec/nbae025>.
- [7] Walter A., Ahsan K., Rahman S. Application of artificial intelligence in demand planning for supply chains: a systematic literature review. *The International Journal of Logistics Management*. 2025. Vol. 36, no. 3. Pp. 672-719. DOI: <https://doi.org/10.1108/ijlm-02-2024-0120>.
- [8] Ahmadi Z. The Role of AI and Machine Learning in Supply Chain Optimization. *International Journal of Modern Achievement in Science, Engineering and Technology*. 2025. Vol. 2, no. 2. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.63053/ijset.77>.
- [9] Applying Machine Learning Approach to Start-up Success Prediction / O. Piskunova et al. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24, no. 11. Pp. 72-84. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.72-84](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.72-84).
- [10] Choi Y. Startup Success Prediction with PCA-Enhanced Machine Learning Models. *Journal of technology management & innovation*. 2024. Vol. 19, no. 4. Pp. 77-88. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-27242024000400077>.
- [11] Tarigan Z.J.H., Siagian H., Jie F. Impact of Enhanced Enterprise Resource Planning (ERP) on Firm Performance through Green Supply Chain Management. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 8. Article 4358. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13084358>.
- [12] History, Features, Challenges, and Critical Success Factors of Enterprise Resource Planning (ERP) in The Era of Industry 4.0 / M. Al-Amin et al. *European Scientific Journal, ESJ*. 2023. Vol. 19, no. 6. Pp. 31-59. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p31>.
- [13] Determining the influence of data on working with video materials on the accuracy of student success prediction models / V. Pylypenko et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5, no. 4(131). Pp. 52-62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313333>.
- [14] Predicting and Defining B2B Sales Success with Machine Learning / S. Mortensen et al. *2019 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS) : conference proceedings, Charlottesville, 26 April 2019. NY, 2019. Pp. 352-356. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2019.8735638>*.
- [15] McQuitty S. The Purposes of Multivariate Data Analysis Methods: an Applied Commentary. *Journal of African Business*. 2017. Vol. 19, no. 1. Pp. 124-142. DOI: <https://doi.org/10.1080/15228916.2017.1374816>.
- [16] Prediction for the Inventory Management Chaotic Complexity System Based on the Deep Neural Network Algorithm / T. Lei et al. *Complexity*. 2023. Vol. 2023. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/9369888>.
- [17] Oluwaseye Joel, L., Doorsamy W., Sena Paul B. A Review of Missing Data Handling Techniques for Machine Learning. *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences*. 2022. Vol. 5(3). Pp. 971-1005. DOI: <https://doi.org/10.1515/IJITIS.2022.5.3.971-1005>.
- [18] Arimie C., Biu E., Ijomah M. Outlier Detection and Effects on Modeling. *Open Access Library Journal*. 2020. Vol. 7. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1106619>.
- [19] Shved A. V., Davydenko Y. O. Outlier detection technique for heterogeneous data using trimmed-mean robust estimators. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. No. 3. Pp. 50-57. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-5>.

- [20] A Modern Introduction to Probability and Statistics / F.M. Dekking et al. London : Springer London, 2005. 488 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/1-84628-168-7>.
- [21] MSCI global investable market value and growth index methodology. 2021. 37 p. URL: https://www.msci.com/eqb/methodology/methods/MSCI_GIMIVGMethod_Feb2021.pdf (дата звернення: 05.01.2024).
- [22] Särndal C.-E., Swensson B., Wretman J. Model Assisted Survey Sampling (Springer Series in Statistics). Springer, 2003. 694 p.
- [23] Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 1965. Vol. 52, no. 3-4. Pp. 591-611. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.
- [24] D'Agostino R., Pearson E.S. Tests for departure from normality. Empirical results for the distributions of b_2 and $\sqrt{b_1}$. *Biometrika*. 1973. Vol. 60, no. 3. Pp. 613-622. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/60.3.613>.
- [25] Anderson T.W., Darling D.A. Asymptotic Theory of Certain «Goodness of Fit» Criteria Based on Stochastic Processes. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1952. Vol. 23, no. 2. Pp. 193-212. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437>.
- [26] Welch B.L. The generalization of 'student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika*. 1947. Vol. 34, no. 1-2. Pp. 28-35. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/34.1-2.28>.
- [27] Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. New York : Routledge, 2013. 567 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203771587>.
- [28] Mann H.B., Whitney D.R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1947. Vol. 18, no. 1. Pp. 50-60. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>.
- [29] Swets J.A. Signal detection theory and ROC-analysis. New York : Academic Press, 1975. 277 p.
- [30] Ben-David S., Shalev-Shwartz S. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. Cambridge University Press, 2014. 449 p.
- [31] The Balanced Accuracy and Its Posterior Distribution / K.H. Brodersen et al. *2010 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Istanbul, Turkey, 23-26 August 2010. Pp. 3121-3124. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpr.2010.764>.
- [32] Kelleher J.D., D'Arcy A., Namee B.M. Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies. MIT Press, 2015. 624 p.
- [33] Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, no. 8. Pp. 861-874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.
- [34] Nonparametric receiver operating characteristic curve analysis with an imperfect gold standard / J. Sun et al. *Biometrics*. 2024. Vol. 80, no. 3. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomtc/ujae063>.
- [35] Çorbacıoğlu Ş., Aksel G. Receiver operating characteristic curve analysis in diagnostic accuracy studies: A guide to interpreting the area under the curve value. *Turkish Journal of Emergency Medicine*. 2023. Vol. 23, no. 4. Pp. 195-198. DOI: https://doi.org/10.4103/tjem.tjem_182_23.

MULTIFACTOR STATISTICAL ANALYSIS OF ORDER SUCCESS AS A TOOL FOR OPTIMIZATION OF AUTOMATED RESOURCE PLANNING AND CONTROL SYSTEMS

Miroshnychenko S.O.	student, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4868-3006 , e-mail: serhii.miroshnychenko@mipolytech.education ;
Vovna O.V.	D.Sc. (Engineering), professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4433-7097 , e-mail: oleksandr.vovna@mipolytech.education

Effective resource management remains a critical challenge in automated enterprise systems. This study addresses predicting order success in B2B segments through multifactor statistical analysis methodology for optimizing automated resource management systems based on historical ERP data. The methodology encompasses automatic selection of statistical tests based on data distribution characteristics. Data preprocessing includes outlier detection using interquartile range methods, missing value imputation, and stratified splitting. Normality assessment uses Shapiro-Wilk, D'Agostino-Pearson, and Anderson-Darling tests, with parametric t-tests for normal distributions and Mann-Whitney U tests for non-normal data. The study analyzed historical B2B order data examining 19 predictor variables across order characteristics, partner metrics, communication patterns, and temporal factors. Statistical significance was evaluated at $\alpha \leq 0,05$, with effect sizes calculated using Cohen's d and Area Under Curve. The predictive model employs weighted voting where significant features contribute to probability calculation based on statistical weight. Results identified seventeen statistically significant predictors. Most influential factors include order message count, partner success rate, and order

changes. The model achieved accuracy of 65,57%, precision of 76,94%, recall of 64,89%, F1-score of 70,40%, and ROC AUC of 0,7224, indicating satisfactory performance for business applications. Communication factors emerge as strongest predictors, with successful orders averaging 10,08 messages versus 6,09 for unsuccessful orders. Partner historical success rates show substantial predictive power, with successful orders associated with 67,46% partner success rates versus 45,90% for unsuccessful orders. The theoretical contribution involves developing adaptive statistical methodology maintaining interpretability while adjusting to data characteristics. Practical applications include inventory optimization, order prioritization, and partnership development. Future directions include machine learning integration and semantic analysis of communication data.

Keywords: statistical analysis, order success prediction, automated resource management systems, normality tests, non-parametric methods, ERP systems, resource optimization.

References

- [1] V. Markuts, and O. Kyzenko, «ERP system as a tool for ensuring the rational use of company resources», *Scientific notes*, vol. 32, pp. 68-78, 2023. doi: **10.33111/vz_kneu.32.23.03.06.045.051**.
- [2] M.R.N.M. Qureshi, «Evaluating Enterprise Resource Planning (ERP) Implementation for Sustainable Supply Chain Management», *Sustainability*, vol. 14, no. 22, article 14779, 2022. doi: **10.3390/su142214779**.
- [3] M. AlMarri, M. Al-Ali, M. Alzarooni, A. AlTeneiji, K. Al-Ali, and Z. Bahroun, «Enterprise Resource Planning Systems for Health, Safety, and Environment Management: Analyzing Critical Success Factors», *Sustainability*, vol. 17, no. 7, article 2947, 2025. doi: **10.3390/su17072947**.
- [4] O.R. Amosu, P. Kumar, Y.M. Ogunsuji, S. Oni, and O. Faworaja. «AI-driven demand forecasting: Enhancing inventory management and customer satisfaction», *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 23, no. 2, pp. 708–719, 2024. doi: **10.30574/wjarr.2024.23.2.2394**.
- [5] L. Schmid, M. Roidl, A. Kirchheim, and M. Pauly, «Comparing Statistical and Machine Learning Methods for Time Series Forecasting in Data-Driven Logistics – A Simulation Study», *Entropy*, vol. 27, no. 1, article 25, 2024. doi: **10.3390/e27010025**.
- [6] Á. Cartea, S.N. Cohen, R. Graumans, S. Labyad, L. Sánchez-Betancourt, L. van Veldhuijzen, «Statistical Predictions of Trading Strategies in Electronic Markets», *Journal of Financial Econometrics*, vol. 23, iss. 2, pp. 1-64, 2024. doi: **10.1093/jjfinec/nbae025**.
- [7] A. Walter, K. Ahsan, and S. Rahman, «Application of artificial intelligence in demand planning for supply chains: a systematic literature review», *The International Journal of Logistics Management*, vol. 36, no. 3, pp. 672-719, 2025. doi: **10.1108/ijlm-02-2024-0120**.
- [8] Z. Ahmadi, «The Role of AI and Machine Learning in Supply Chain Optimization», *International Journal of Modern Achievement in Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 1-8, 2025. doi: **10.63053/ijset.77**.
- [9] O. Piskunova, L. Ligonenko, R. Klocho, T. Frolova, and T. Bilyk, «Applying Machine Learning Approach to Start-up Success Prediction», *Scientific Horizons*, vol. 24, no. 11, pp. 72-84, 2021. doi: **10.48077/scihor.24(11).2021.72-84**.
- [10] Y. Choi, «Startup Success Prediction with PCA-Enhanced Machine Learning Models», *Journal of technology management & innovation*, vol. 19, no. 4, pp. 77-88, 2024. doi: **10.4067/s0718-27242024000400077**.
- [11] Z.J.H. Tarigan, H. Siagian, and F. Jie, «Impact of Enhanced Enterprise Resource Planning (ERP) on Firm Performance through Green Supply Chain Management», *Sustainability*, vol. 13, no. 8, article 4358, 2021. doi: **10.3390/su13084358**.
- [12] M. Al-Amin, M.T. Hossain, M.J. Islam, and S. Kumar Biwas, «History, Features, Challenges, and Critical Success Factors of Enterprise Resource Planning (ERP) in The Era of Industry 4.0», *European Scientific Journal, ESJ*, vol. 19, no. 6, pp. 31-59, 2023. doi: **10.19044/esj.2023.v19n6p31**.
- [13] V. Pylypenko, V. Statsenko, T. Bila, and D. Statsenko, «Determining the influence of data on working with video materials on the accuracy of student success prediction models», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 4(131), pp. 52-62. doi: **10.15587/1729-4061.2024.313333**.
- [14] S. Mortensen, M. Christison, B. Li, A. Zhu, and R. Venkatesan, «Predicting and Defining B2B Sales Success with Machine Learning», in *Proceedings of the 2019 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, Charlottesville, USA, 2019, pp. 352-356. doi: **10.1109/SIEDS.2019.8735638**.
- [15] S. McQuitty, «The Purposes of Multivariate Data Analysis Methods: an Applied Commentary», *Journal of African Business*, vol. 19, no. 1, pp. 124-142, 2017. doi: **10.1080/15228916.2017.1374816**.
- [16] T. Lei, R.Y.M. Li, N. Jotikastira, H. Fu, and C. Wang, «Prediction for the Inventory Management Chaotic Complexity System Based on the Deep Neural Network Algorithm», *Complexity*, vol. 2023, pp. 1-11, 2023. doi: **10.1155/2023/9369888**.
- [17] L. Oluwaseye Joel, W. Doorsamy, and B. Sena Paul, «A Review of Missing Data Handling Techniques for Machine Learning», *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 971-1005, 2022. doi: **10.1515/IJITIS.2022.5.3.971-1005**.
- [18] C. Arimie, E. Biu, and M. Ijomah, «Outlier Detection and Effects on Modeling», *Open Access Library*

- Journal*, vol. 7, pp. 1-30, 2020. doi: **10.4236/oalib.1106619**.
- [19] A.V. Shved, Y.O. Davydenko, «Outlier detection technique for heterogeneous data using trimmed-mean robust estimators», *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 3, pp. 50-57, 2022. doi: **10.15588/1607-3274-2022-3-5**.
- [20] F.M. Dekking, C. Kraaikamp, H.P. Lopuhaä, and L.E. Meester, *A Modern Introduction to Probability and Statistics*. Springer London, 2005. doi: **10.1007/1-84628-168-7**.
- [21] MSCI global investable market value and growth index methodology. [Online]. Available: https://www.msci.com/eqb/methodology/meth_docs/MSCI_GIMIVGMethod_Feb2021.pdf. Accessed on: January 5, 2014.
- [22] C.-E. Särndal, B. Swensson, and J. Wretman, *Model Assisted Survey Sampling (Springer Series in Statistics)*. Springer, 2003.
- [23] S.S. Shapiro, and M.B. Wilk, «An analysis of variance test for normality (complete samples)», *Biometrika*, vol. 52, no. 3-4, pp. 591-611, 1965. doi: **10.1093/biomet/52.3-4.591**.
- [24] R. D'Agostino, and E.S. Pearson, «Tests for departure from normality. Empirical results for the distributions of b_2 and $\sqrt{b_1}$ », *Biometrika*, vol. 60, no. 3, pp. 613-622, 1973. doi: **10.1093/biomet/60.3.613**.
- [25] T.W. Anderson, and D.A. Darling, «Asymptotic Theory of Certain «Goodness of Fit» Criteria Based on Stochastic Processes», *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 23, no. 2, pp. 193-212, 1952. doi: **10.1214/aoms/1177729437**.
- [26] B.L. Welch, «The generalization of 'student's' problem when several different population variances are involved», *Biometrika*, vol. 34, no. 1-2, pp. 28-35, 1947. doi: **10.1093/biomet/34.1-2.28**.
- [27] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York, USA: Routledge, 2013. doi: **10.4324/9780203771587**.
- [28] H.B. Mann, and D.R. Whitney, «On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other», *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, no. 1, pp. 50-60, 1947. doi: **10.1214/aoms/1177730491**.
- [29] J.A. Swets, *Signal detection theory and ROC-analysis*. New York, USA: Academic Press, 1975.
- [30] S. Ben-David, and S. Shalev-Shwartz, *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014.
- [31] K.H. Brodersen, C.S. Ong, K.E. Stephan, and J.M. Buhmann, «The Balanced Accuracy and Its Posterior Distribution», in *Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 3121-3124. doi: **10.1109/icpr.2010.764**.
- [32] J.D. Kelleher, A. D'Arcy, and B.M. Namee, *Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies*. MIT Press, 2015.
- [33] T. Fawcett, «An introduction to ROC analysis», *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 861-874, 2006. doi: **10.1016/j.patrec.2005.10.010**.
- [34] J. Sun, C. Tang, W. Xie, and X.-H. Zhou, «Nonparametric receiver operating characteristic curve analysis with an imperfect gold standard», *Biometrics*, vol. 80, no. 3, pp. 1-12, 2024. doi: **10.1093/biometc/ujae063**.
- [35] Ş. Çorbacıoğlu, and G. Aksel, «Receiver operating characteristic curve analysis in diagnostic accuracy studies: A guide to interpreting the area under the curve value», *Turkish Journal of Emergency Medicine*, vol. 23, no. 4, pp. 195-198, 2023. doi: **10.4103/tjem.tjem_182_23**.

Стаття надійшла 18.05.2025

Стаття прийнята 02.06.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Мірошніченко С.О., Вовна О.В. Багатофакторний статистичний аналіз успішності замовлень як інструмент оптимізації автоматизованих систем керування ресурсами. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 182-190. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336372>.

SYMBIOSIS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND SHIP'S AUTOMATED
ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS: PRESENT AND FUTURE

- Simanenkov A.L.** PhD (Engineering), senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0797-5276>, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com;
- Samoilov S.O.** postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4454-0510>, e-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com

The paper addresses the current challenge of enhancing the efficiency, safety, and environmental sustainability of maritime transport. The main article's idea is that this aim can be achieved by integrating artificial intelligence (AI) technologies into a ship's automated electrical energy systems (SAEES). The first article's part is dedicated to the evolution of the SAEES architecture and six main energy management strategies: centralized and decentralized systems, hierarchical methodologies, model predictive control, agent-oriented control systems, and energy management systems. The analysis of each approach includes its advantages and disadvantages, considering parameters such as efficiency, stability, implementation and maintenance costs, environmental impact, complexity, and scalability. The second part concentrated on reviewing applications of AI technologies in the maritime industry. It presented practical examples of AI usages in the marine industry, particularly in navigation, diagnostics, and route optimization. Another attention was focused on the profit of integrating AI into SAEES. It was found that this symbiosis can bring improvement to every core parameter in these systems. The main challenges associated with global issues of safety and cybersecurity of AI systems, exceptional employees' qualification, complexity of integration with existing systems, guaranteeing the stability and predictability of AI algorithms, problems of data quality and standardization, regulatory and ethical aspects. Moreover, the paper presents potential future developments of AI and ship electrical energy control systems' symbiosis. The primary objectives include further SAEES automatizations, integrating with new energy sources, optimizing ship equipment operation, and solving existing challenges and limitations.

Keywords: ship energy systems, energy efficiency, optimization, machine learning, artificial intelligence, maritime transport, environmental impact, maritime safety, cybersecurity.

Statement of the problem

Maritime transport plays a key role in globalization, providing a significant part of international trade's transportation. The efficiency, safety, and environmental friendliness of marine operations are industrial aspects of the ongoing development of the world economy. According to the International Maritime Organization (IMO), in 2023, the global shipping industry emitted more than 1 billion tons of CO₂. In this view, the requirements for the maritime industry to improve energy efficiency, reduce operating costs, and minimize environmental impact are constantly growing [1, 2].

Robust and efficient ship's automated electrical energy systems (SAEES) are the core of safe and uninterrupted operations in the maritime industry. A ship, like a floating city, requires electricity to guarantee the vital activities of the crew, the functioning of navigation equipment, cargo systems, and other critical mechanisms [3].

At the same time, with the growing demands on the maritime industry, we can see the fast development of artificial intelligence (AI) technologies, which demonstrate outstanding potential to transform various fields of life, including maritime transportation. AI is already helping to optimize routes, predict maintenance needs, enhance shipping safety, and automate numerous processes. According to a report by Lloyd's Register, the global market for AI developments in the maritime industry is estimated at 1.5 billion \$ per year. It is expected to double over the next five years [[4]].

In this context, the study of AI and SAEES symbiosis is relevant. The integration with AI can open up numerous opportunities for solving existing problems, enhancing the efficiency, stability, and safety of ship operations. On the other side, it will contribute to the environmental achievements by international regulatory bodies.

Modern SAEES are complex systems that include various energy sources, distribution networks, and numerous electrical consumers. During the operation of these systems, typical problems occur, including blackouts caused by equipment failures, personnel errors, or external factors. Inefficient energy use or unnecessary fuel consumption leads to increased harmful emissions, as well as maintenance and repair problems, especially in a complex marine environment. Due to corrosion, equipment wear, and difficulties in investigating faults, there are increased risks. Batteries, used as a backup energy source, lose their capacity over time and require frequent replacement. Probabilities of overload and short circuits in electrical networks, energy quality, voltage and frequency fluctuations, can also negatively affect the operation of shipboard systems.

Traditional methods are not effective enough to solve all these problems in the conditions of increasing systems complexity and requirements for their productivity. AI technologies have great potential to provide more intelligent, adaptive, and efficient management of SAEES. AI can be used to forecast loads, optimize generator parameters, diagnose faults early, and make informed decisions in real-time. All this will contribute to the improvement of

efficiency, robustness, and safety of ship operations. Therefore, research into the perspectives of AI and SAEES symbiosis is up to date.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

The latest research in the field of SAEES management demonstrates a growing interest in introducing intelligent and optimization approaches to enhance the quality of energy systems.

One of the leading directions is the evolution and application of energy management systems (EMS). It integrates several energy sources (including renewable) and energy storage kits aimed at optimizing the overall energy consumption on a ship [5].

Researchers are heavily focused on model predictive control (MPC) strategy to optimize energy distribution, load management, and voltage/frequency regulation. MPC allows consideration of nonlinear system dynamics and the multiplicity of operational constraints, providing proactive control based on predictions of future system behaviour.

The next path of study is the development of agent-oriented control systems (AOC). AOC uses autonomous agents to coordinate the various components of the SAEES, thereby enhancing the system's survivability. It can bring high fault resistance and the ability to reconfigure dynamically.

Moreover, researchers investigated the ability to use digital twins for monitoring, optimizing, and predicting the state of SAEES. Digital twins enable the modelling of a physical system's behavior in a virtual environment. This technology allows for easier monitoring of processes, faster problem resolution, and more accurate prediction of the ship's configuration. Digital twins are successfully used in employee training programs.

One more direction is decentralized control systems. This approach helps to increase the stability and scalability of the SAEES by distributing control functions between local controllers. Decentralization of control leads to faster response to local events and reduces the risk of single points of failure [6].

The integration of renewable energy sources, such as solar panels and wind turbines, into the SAEES is also receiving significant attention. It has a global goal to reduce dependence on fossil fuels and minimize emissions [5].

Interest in using AI to solve various tasks in the maritime industry has quickly grown. In navigation, AI is considered an instrument to develop autonomous ships with decision-making support systems for the crew. For example, SeaPod AI system by Orca AI, can perform the functions of an automated observer on the bridge, increasing situational awareness and preventing collisions. AI is used for equipment diagnostics and to predict the technical condition of systems and units, enabling predictive maintenance and the prevention of emergencies. Intending to optimize ship routes, AI analyses meteorological data, ocean flows, and other factors that affect fuel consumption and

travel time. Moreover, AI can assist in managing cargo operations in ports and on vessels, thereby improving maritime safety by detecting obstacles and monitoring the crew's state [7].

In general, the analysis of existing research indicates that integrating artificial intelligence into ship energy management systems is a promising direction; however, the number of publications directly devoted to this topic remains limited. Most research focuses on individual aspects of using AI in the maritime industry.

Thus, a certain gap exists in knowledge regarding the perspectives and challenges associated with the symbiosis of AI and SAEES systems, which confirms the relevance of further research in this direction.

Purpose and task statement

The aim of this work is to analyse the perspectives of artificial intelligence and shipboard energy systems control's symbiosis.

Specific research objectives include:

- Review of operation principles and typical problems of shipboard energy systems.
- Analysis of modern approaches to energy supply management on ships, including traditional methods and new technologies.
- Research on the implementation of AI technologies in the maritime industry, particularly in navigation, diagnostics, and route optimization.
- Identification of potential advantages from integrating AI into SAEES, such as increasing energy efficiency, environmental friendliness, and safety.
- Consideration of main issues and challenges associated with the combination of AI and SAEES, focused on safety issues, cybersecurity, and crew qualifications.

Concluding future trends and directions of AI integration with SAEES control systems.

Materials and methods

The scientific publications analysed in this research were obtained during April-May 2025, from the databases of scientific article aggregators ResearchGate and MDPO. These sources are considered high-quality databases for bibliometric analysis. It provides the necessary information for identification and a reality check of publications. Works published in authoritative professional journals from 2020 to 2025 were selected. The language of the publications was limited to English, which is currently the most common academic language.

The analysis of the topic «symbiosis of artificial intelligence and ship energy systems» contains two main parts: «comparison of existing strategies for controlling ship energy systems» and «analysis of existing and potential integrations of AI and machine learning in the maritime industry». The research is conducted to clarify the impact of modern technologies on key indicators, including energy efficiency, environmental impact, safety, cost, and the complexity of implementing and maintaining ship systems.

Summary of the main material

SAEES are complex systems designed for the generation, distribution, and consumption of electrical energy on board the vessel (Fig. 1). The main components of these systems are generators, for example, diesel-driven ones, which convert mechanical energy into electrical energy using the principle of electromagnetic induction [3].

Shipboard electrical systems are complex and multi-level, requiring attentive monitoring and management to ensure a stable and effective energy supply to all onboard consumers. Understanding the fundamental concept of every individual component's operation and its interaction is necessary for the integration possibilities with AI, which can be used to analyse further and optimize the work of each element and the entire system as a complex whole.

Analysis of modern approaches to energy supply management.

Centralized control systems are based on a single central controller that manages all energy processes on the ship. Typically, this system builds on specialized hardware controllers, communication networks to collect data and transmit control signals, and preprogrammed logic or algorithms. The primary advantage is the potential for global optimization of the entire energy system, providing a comprehensive overview of its current state. This also simplifies the coordination of different energy sources and loads under normal operating conditions. But there are also considerable negatives. The main one is the risk of a single failure point, when a breakdown of the central controller can conduct to a full blackout. Furthermore, centralized systems have scalability problems when it is necessary to expand or reconfigure current systems. Centralized

decision-making can lead to increased latency, particularly in large and complex systems [6].

Decentralized control systems comprise several local controllers that are responsible for individual subsystems or zones, making autonomous, information-based decisions and interacting with other controllers. These technologies also include distributed computing units, local sensors/actuators, and peer-to-peer communication protocols. The decentralized approach fixes the previous strategy's main problem by eliminating a single failure point. These systems are easily scalable due to their ability to plug-and-play connectivity. Potential disadvantages include the difficulty of gaining global system optimization and coordination between different subsystems. Decentralized control offers important strengths in terms of stability and scalability, making it a preferred choice in the marine sector, which requires high survivability. The ability to operate independently and quickly react to local events raises the system's resistance to failures and cyberattacks [6].

Hierarchical control methodologies involve a multi-level structure that typically includes primary control (local control of individual units), secondary control (voltage/frequency coordination and regulation), and tertiary control (overall system optimization and coordination). Each level solves specific tasks, where higher levels are monitoring and coordinating lower ones. The difficulty of designing and coordinating different control levels is a potential problem. Hierarchical control provides a robust structure for managing the growing complexity of SAEES by delegating the control task into manageable levels with clear responsibilities. This way allows local optimization and global coordination, which guarantees efficient and stable work under various conditions [8].

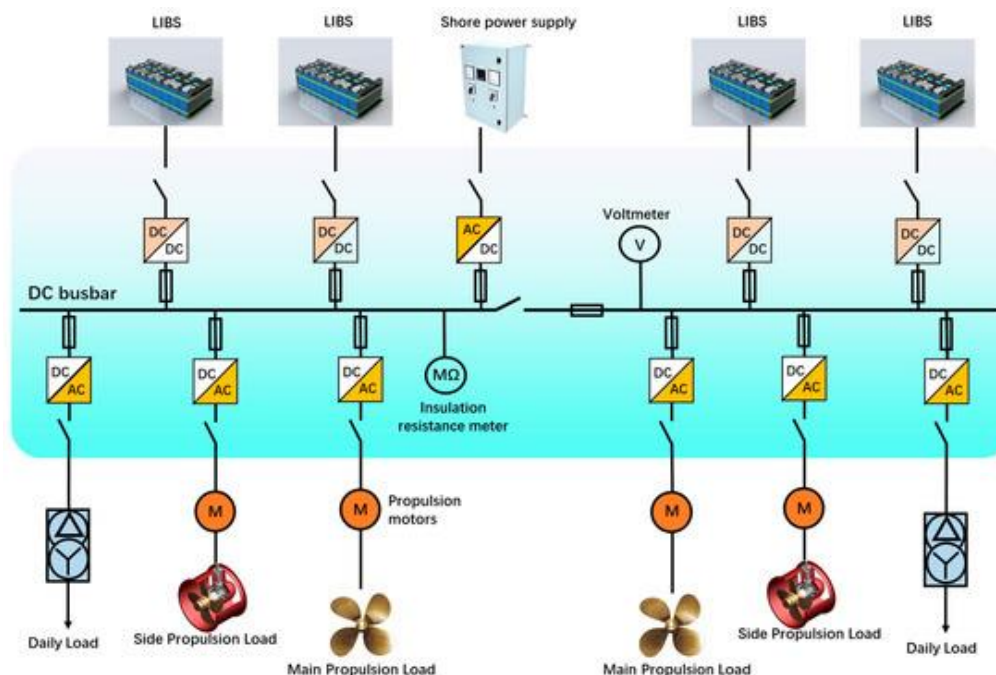


Fig. 1 – Ship's electric energy system schematic diagram

Model predictive control (MPC) uses a model of the system to predict its future behaviour and optimizes control actions. In SAEES, MPC is used for optimal energy management, load sharing, and voltage/frequency regulation. MPC is a powerful control technology that offers great potential for optimizing the performance of SAEES, especially in systems with composite operational requirements and dynamic loads. Its ability to predict future needs and constraints allows a more well-planned and stable process compared to traditional feedback control methods [5].

Agent-based control systems use autonomous software agents, each associated with a specific component or subsystem, that interact and cooperate to achieve the goals. In these systems, all agents can collect information, process data independently, and make decisions according to different conditions. There is a potential for seamless integration of new components and functionality. Agent-based control offers an adaptive approach to the management of SAEES, especially in scenarios that require fault resistance and dynamic reconfiguration, such as manoeuvring operations. The autonomous nature of the agents allows the system to continue to operate effectively even if some parts are damaged or unavailable.

Energy Management Systems (EMS) are integrated systems that monitor, control, and optimize the generation, storage, distribution, and consumption of electricity on board. EMS technologies and functionalities include advanced management algorithms, data analytics, real-time monitoring, and interfaces with different energy system components. The system offers adaptive and scalable power for propulsion and onboard mechanisms. Core features consist of standardized design, integration with shore energy systems, and suitability for low- and medium-voltage networks. The ship's electrical network distributes available energy throughout the ship, increasing energy efficiency and helping to reduce emissions [4].

The comparative analysis given in Table 1 demonstrates some trade-offs between different approaches. Decentralized and agent-based systems are highly robust and scalable, while MPC and EMS offer high optimization potential. Hierarchical control provides a balance, while centralized control is simpler but less safe. The choice of the most suitable approach depends on the specific requirements and priorities of the ship's owners and vessel type.

Table 1

Comparative analysis of modern approaches to the management of ship energy systems

Criterion	Centralized	Decentralized	Hierarchical	MPC-based	Agent-based	EMS
Efficiency	2* (global optimization)	2-3 (locally suboptimal)	3 (balance local/global)	4-5	4 (adaptive optimization)	4-5
Reliability	1-2 (single point of failure)	4-5	3-4	3	4-5	4-5
Implement cost	3	3-4	4-5	4-5	4-5	4-5
Maintenance cost	3	3	3	4-5 (model maintenance)	3	3-4
Environmental impact	1-2 (indirect impact)	1-2 (indirect impact of local actions)	2-3 (effects on higher levels)	2-3 (direct optimizes emissions)	1-2 (indirect impact)	2-3 (direct optimizes emissions)
Complexity	3	4-5 (coordination)	4-5	4-5	4-5	4-5
Scalability	2	4-5	3-4	3	4-5	4-5
Handling dynamic loads	1-2 (can be slow)	3-4 (rapid local response)	3-4 (multilevel reaction)	4-5 (proactive)	4-5 (adaptive response)	4-5 (integrated processing)
Real-time adaptability	1-2 (limited)	4-5	3	4-5	4-5	4-5

*Rating from 1-small value/impact to 5-high.

Integration of artificial intelligence in the maritime industry.

Artificial intelligence (AI) with machine learning is revolutionizing all sectors of the maritime industry, offering innovative solutions to enhance the efficiency, safety, and sustainability of shipping. With the invention of autonomous large language models (LLMs), the usage of these technologies became available even in conditions of a lack of communication. It gave a significant impulse to the development of technologies in the maritime industry. In navigation, AI helps develop autonomous ship systems that can make decisions on course, speed, and manoeuvring independently. Moreover, AI is being integrated into decision-making support systems for the crew, providing recommendations based on the analysis of large amounts of data. In the process of technical maintenance, AI is used to predict the state of equipment and systems. This allows it to move from active to predictive maintenance. AI algorithms analyse data from sensors installed on various units, detecting anomalies and predicting possible breakdowns. This makes it possible to implement necessary repairs on time, preventing serious accidents and reducing vessel downtime [7, 15].

Optimization of ship routes is another important area of AI application. By analysing meteorological data, information on ocean waves, ship traffic, and other factors, AI algorithms can determine the most efficient routes, which can decrease fuel consumption and reduce travel time.

AI serves to manage cargo operations in port terminals and on ships, optimizing loading and unloading processes, cargo placement, and planning operations. The

application of AI contributes to improving maritime safety by detecting obstacles on the vessel's path, predicting collision risks, and monitoring the crew's condition to prevent errors related to the human factor.

In general, as shown in Table 2, artificial intelligence is already demonstrating promising potential for improving the efficiency, safety, and sustainability of maritime operations in various areas. The practical implementation of AI technologies in the marine industry creates a solid foundation for its integration into SAEES, which also requires intelligent data analysis, forecasting, and decision-making optimization [7, 12, 13].

Benefits of integrating AI and SAEES.

Increased efficiency. AI can analyse historical and current data, such as weather conditions, operating modes, and equipment performance, to optimize energy consumption. As a result of its load-predicting ability, AI can dynamically regulate energy generation and distribution, preventing overproduction. Intelligent load management allows AI to prioritize and plan the use of electrical loads based on operational needs and available energy capacity. This can show a path to more efficient utilization of generated energy and reduce additional generator runtime. Optimizing energy generation with AI enables defining the optimal number of generators to run simultaneously and their corresponding load levels to achieve maximum efficiency. This is especially important for managing hybrid energy systems, where AI can optimize the interaction between traditional generators, energy storage systems, and renewable energy sources [6].

Table 2

Examples and benefits of the successful integration of AI in the maritime industry

<i>Scope of application</i>	<i>AI methods</i>	<i>Examples/Benefits</i>
Failure prediction	Machine learning, neural networks	VoyageX AI PMS (40% downtime reduction), ABB Ability™ (increased reliability), MarineInsight™ (proactive maintenance)
Energy consumption optimization	Machine learning, neural networks	Maersk (reducing fuel consumption), ABB Ability™ OptimE (propulsion optimization), Neural Networks (fuel consumption prediction)
Load management	Machine learning	AI for optimal load planning (maximizing space utilization), NanoPredict (balancing energy supplies)
Autonomous navigation and control	Machine learning, neural networks	Yara Birkeland (fully autonomous vessel), ABB Ability™ Marine Pilot Control (automation of key operations)
Safety and security	Machine learning, expert systems	AI for anomaly detection (fire, water intrusion), AI for risk assessment, AI for cybersecurity
Optimization of port operations	Machine learning	AI to berth allocation, traffic management, cargo handling (increasing efficiency)

Increasing robustness. AI has a high impact on improving the robustness of SAEES through its ability to predict equipment failures. By analysing data from multiple sensors, such as vibration, temperature, and voltage sensors, AI can detect potential faults and anomalies at an early stage, allowing preventive maintenance execution before major breakdowns occur. This approach to maintenance can significantly reduce ship downtime and repair costs. AI can also ensure uninterrupted monitoring of critical electrical components, such as generators, motors, and transformers, thereby preventing unexpected failures. Additionally, AI aids in improving fault diagnosis by quickly and accurately identifying the causes of problems in the electrical system. AI can also be used to estimate the remaining life of equipment, predicting its real service life.

Improving safety. AI can analyse real-time data to detect potential dangers, such as equipment overheating or electrical errors, allowing it to prevent accidents at the right time. AI-based inspection systems can monitor preconditions of hazardous situations, such as gas leaks or smoke, enabling immediate response to emergencies. In navigation, AI can help prevent collisions by analysing sensor data and predicting risks [10]. Automating routine tasks in energy management helps reduce the human factor, one of the primary causes of accidents at sea. AI-based decision support systems provide operators with timely and accurate information, enabling them to make more informed and well-reasoned conclusions.

Reduced operating costs. AI, combined with the control part of the SAEES, can enhance the cost efficiency of ships. Fuel savings are a primary goal achieved through AI-based route optimization and speed management. It is predicted that fuel savings can reach from 3% to 15%. Minimizing service cost is possible by predictive maintenance, which prevents costly breakdowns and limits necessary responses to unexpected failures. AI also helps optimize resource utilization by more efficiently managing the operation of generators, energy storage systems, and other components of the energy system. In the long term, with growing automation, the percentage of energy supply management and ship operations will lead to a reduction of personnel expenses.

Process automation. AI opens a great opportunity to increase the level of automation in SAEES. Autonomous energy management allows AI to make real-time decisions about energy production and distribution without human intervention. This is especially relevant for autonomous ships, where AI plays a key role in managing all onboard systems. The market for autonomous ships is showing outstanding growth and is predicted to reach billions of dollars in the near future.

The integration of renewable energy sources into shipboard energy systems is an essential part of the emission reduction process. AI can analyse the ability and volume generation of renewable energy sources (solar, wind) based on meteorological data. This allows better control and planning of the usage of these periodic energy sources. AI can also optimize the utilization of accumulated

renewable energy reserves, giving them priority over traditional sources in cases where it is feasible. Additionally, AI can effectively manage energy storage, optimizing charging and discharging processes.

Problems and Challenges of Artificial Intelligence Integration.

Cybersecurity. The inclusion of AI in shipboard energy systems, while bringing benefits, also creates several problems, among which cybersecurity occupies a special place. Increasing connectivity and dependence on digital systems make ships more vulnerable to cyberattacks. AI systems can become a target of attacks aimed at disrupting their operation or gaining unauthorized access to confidential data. Therefore, the development and implementation of robust protection measures against malware is important. At the same time, AI can also be used to improve security, detect anomalies, and predict potential threats [9, 14].

The stability of AI systems is another big challenge. The effectiveness of AI directly depends on the quality of data on which it is trained and with which it works. Poor-quality data can lead to inaccurate predictions and unreliable decisions. For this reason, the validation and verification of AI systems are critical to ensure their safe and reliable operation. AI systems must be able to function stably in the challenging conditions of the marine environment, including exposure to vibration, extreme temperatures, and high humidity.

Specialized knowledge is necessary. The successful integration of AI into SAEES requires qualified personnel in both the spheres of marine engineering and artificial intelligence. The scarcity of qualified specialists needs to be overcome. To resolve this problem, we need to train new employees and retrain existing personnel [11].

Integrating AI systems with existing shipboard infrastructure can be challenging due to hardware and software compatibility issues. Ensuring seamless data exchange between AI models and other onboard systems is crucial, but the use of different data formats and communication protocols can complicate this process.

Regulatory aspects. The development of the regulatory framework for the use of AI in the maritime industry is still ongoing, resulting in a lack of clear regulatory boundaries [10]. Creation of international standards is necessary for the global implementation of AI in the maritime industry.

Ethical considerations. The use of AI in managing SAEES also raises some ethical concerns. Determining responsibility for incidents related to the operation of AI-controlled systems can be a challenging task. There is also a risk that the data on which AI algorithms are trained may be biased, potentially leading to unfair or discriminatory decisions. Transparency and validity of AI decision-making are also important aspects, especially in the maritime industry.

Implementation cost. Implementing AI systems in shipboard energy systems involves significant initial investments in hardware, software, and development. This

can be a barrier to adoption, especially for smaller shipping companies.

Comparison of traditional control methods and AI approaches. Traditional methods of managing ship energy systems are often built on rule-based systems and manual regulation, which can perform suboptimally in dynamic environments. AI systems are capable of continuously learning and adapting to optimize energy consumption and distribution in real-time. Traditional systems may have slower response times to sudden load changes or fault conditions. In contrast, AI-controlled systems can respond quickly and intelligently to changing conditions, preventing failures and enhancing safety. Traditional EMS configurations are typically static and require manual reprogramming for major changes. AI systems can learn from operational data and transform their control strategies to improve performance and efficiency continuously. Traditional methods can struggle to manage the increasing complexity of modern marine energy systems. AI is well-suited to working with complex systems, analysing large amounts of data, and discovering composite relationships.

Conclusions

The conducted research made it possible to analyse different approaches to managing the ship's energy systems and draw conclusions regarding the use of these technologies on various types of ships.

For military vessels, the most important criteria are stability and the ability to operate in conditions of partially damaged systems. Therefore, decentralized, agent-oriented, and EMC systems are chosen.

For commercial ships, which are focused on maximizing profit, the best choices are MPC-based and EMC systems.

Cruise ships need stability for a large amount of equipment. Decentralized and agent-oriented systems can help with this.

Small ships can select any technology depending on their financial capabilities.

The second part of the research reviewed examples of AI applications in the maritime industry and analysed the prospects for developing a symbiosis of AI-based control systems and onboard energy systems. The obtained results confirm the great potential of AI technologies for enhancing energy efficiency, stability, and safety of ship operations. The speed of operation and minimization of errors lead to decreased operational costs and a negative impact on the environment.

At the same time, the implementation of AI in the maritime industry is associated with serious problems and challenges, including cybersecurity concerns, the need for qualified personnel, and the complexity of integrating AI with existing equipment. Along these lines, further research and development are needed to resolve these difficulties and create reliable and safe AI solutions for the maritime industry.

Future research directions include developing universal, complex software that can work with AI assistants and various large language models, both remotely and locally. It should work according to the modular principle, allowing for the connection of interaction blocks with different systems. It is also crucial to have the option of quick configuration for specific equipment on the various ships.

The next step should be to integrate this software with models of real equipment in the MATLAB Simulink ecosystem. This step should focus on testing, optimizing, and improving the stability and performance of the system. Special attention will be focused on improving cybersecurity.

The result of the research should be the implementation of an autonomous AI-based energy management system on a ship that will support work with various energy sources and storage systems, use machine learning for more accurate load forecasting and equipment optimization.

In summary, the integration of artificial intelligence and shipboard electrical energy systems is a key factor in the resource-efficient development of maritime transportation.

References

- [1] Z. Wang, M. Li, N. Cao, P. Liao, Y. Ji, and F. Han, «Enhancing renewable energy utilization and energy management strategies for new energy yachts», *Helijon*, vol. 10(18), article e37863, 2024. doi: **10.1016/j.helijon.2024.e37863**.
- [2] Z. Bei et al., «Challenges and Solutions of Ship Power System Electrification», *Energies*, vol. 17(13), article 3311, 2024. doi: **10.3390/en17133311**.
- [3] What is Marine Electricity And How It is Generated. [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/>. Accessed on: April 10, 2025.
- [4] Maritime Artificial Intelligence & Machine Learning: Ultimate Guide. [Online]. Available: <https://spire.com/maritime/maritime-artificial-intelligence-and-machine-learning/>. Accessed on: April 10, 2025.
- [5] W. Chen et al., «Robust Real-Time Shipboard Energy Management System With Improved Adaptive Model Predictive Control», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 110342-110360, 2023. doi: **10.1109/access.2023.3321692**.
- [6] M.D.A. Al-Falahi, T. Tarasiuk, S.G. Jayasinghe, Z. Jin, H. Enshaei, and J.M. Guerrero, «AC Ship Microgrids: Control and Power Management Optimization», *Energies*, vol. 11(6), article 1458, 2018. doi: **10.3390/en11061458**.
- [7] D. Simion, F. Postolache, B. Fleacă, and E. Fleacă, «AI-Driven Predictive Maintenance in Modern Maritime Transport-Enhancing Operational Efficiency and

- Reliability», *Applied Sciences*, vol. 14(20), article 9439, 2024. doi: 10.3390/app14209439.
- [8] Z. Jin, L. Meng, J.M. Guerrero, and R. Han, «Hierarchical Control Design for a Shipboard Power System With DC Distribution and Energy Storage Aboard Future More-Electric Ships», *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14(2), pp. 703-714, 2018. doi: 10.1109/tii.2017.2772343.
- [9] T. Miller, I. Durlík, E. Kostecka, S. Sokołowska, P. Kozłowska, and R. Zwolak, «Artificial Intelligence in Maritime Cybersecurity: A Systematic Review of AI-Driven Threat Detection and Risk Mitigation Strategies», *Electronics*, vol. 14(9), article 1844, 2025. doi: 10.3390/electronics14091844.
- [10] Utilizing AI for Maritime Transport Optimization. [Online]. Available: <https://cmr.berkeley.edu/2024/12/utilizing-ai-for-maritime-transport-optimization/>. Accessed on: April 10, 2025.
- [11] Y. Zahraoui et al., «AI Applications to Enhance Resilience in Power Systems and Microgrids. A Review», *Sustainability*, vol. 16(12), article 4959, 2024. doi: 10.3390/su16124959.
- [12] I. Durlík, T. Miller, E. Kostecka, and T. Tuński, «Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications», *Applied Sciences*, vol. 14(18), article 8420, 2024. doi: 10.3390/app14188420.
- [13] L. Ilias et al., «Leveraging extreme scale analytics, AI and digital twins for maritime digitalization: the VesselAI architecture», *Frontiers in Big Data*, vol. 6, 2023. doi: 10.3389/fdata.2023.1220348.
- [14] J. Xue et al., «Machine Learning in Maritime Safety for Autonomous Shipping: A Bibliometric Review and Future Trends», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13(4), article 746, 2025. doi: 10.3390/jmse13040746.
- [15] M.Á. Gómez Ruiz, I.M. de Almeida, and R. Pérez Fernández, «Application of Machine Learning Techniques to the Maritime Industry», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11(9), article 1820, 2023. doi: 10.3390/jmse11091820.

СИМБІОЗ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ І СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СУДНОВОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ: СУЧАСНЕ ТА МАЙБУТНЄ

Сіманенков А.І.

канд. техн. наук, ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0797-5276>, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com;

Самойлов С.О.

здобувач ступеня PhD, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4454-0510>, e-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com

Стаття присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності, безпеки та екологічності морського транспорту. Основна ідея статті полягає в тому, що цієї мети можна досягти шляхом інтеграції технологій штучного інтелекту (ШІ) в суднові автоматизовані електроенергетичні системи (САЕЕС). Перша частина дослідження присвячена еволюції архітектури САЕЕС та шести основним стратегіям управління енергопостачанням: централізовані та децентралізовані системи, ієрархічні, керування на основі модельного прогнозування, агентно-орієнтовані та системи управління енергоспоживанням. Аналіз кожного підходу включає його переваги та недоліки у розрізі таких параметрів, як ефективність, стабільність, витрати на впровадження та обслуговування, вплив на навколишнє середовище, складність та масштабованість. Друга частина статті зосереджена на огляді застосування технологій ШІ в морській індустрії. Було представлено практичні приклади інтеграції ШІ в морську галузь, зокрема в навігації, діагностиці та оптимізації маршрутів. Також увага була зосереджена на перевагах інтеграції ШІ в САЕЕС. Було виявлено, що цей симбіоз може покращити кожен ключовий параметр у цих системах. Основні виклики пов'язані з глобальними питаннями безпеки та кібербезпеки систем штучного інтелекту, спеціальною кваліфікацією працівників, складністю інтеграції з існуючими системами, гарантією стабільності та передбачуваності алгоритмів штучного інтелекту, проблемами якості та стандартизації даних, регуляторними та етичними аспектами. Крім того, у статті представлені потенційні напрямки майбутнього розвитку симбіозу штучного інтелекту та систем керування судновою енергосистемою. Основна мета охоплює подальшу автоматизацію систем керування, інтеграцію з новими джерелами енергії, оптимізацію роботи суднового обладнання та вирішення наявних проблем та обмежень.

Ключові слова: електроенергетичні системи суден, енергоефективність, оптимізація, машинне навчання, штучний інтелект, морський транспорт, вплив на навколишнє середовище, безпека на морі, кібербезпека.

Перелік використаних джерел

- [1] Enhancing renewable energy utilization and energy management strategies for new energy yachts / Z. Wang et al. 2024. *Heliyon*. Vol. 10(18). Article e37863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37863>.
- [2] Challenges and Solutions of Ship Power System Electrification / Z. Bei et al. 2024. *Energies*. Vol. 17(13).

- Article 3311. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17133311>.
- [3] What is Marine Electricity And How It is Generated. URL: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/> (date of access 02.04.2025).
- [4] Maritime Artificial Intelligence & Machine Learning: Ultimate Guide. URL: <https://spire.com/maritime/maritime-artificial-intelligence-and-machine-learning/> (date of access 02.04.2025).
- [5] Robust Real-Time Shipboard Energy Management System With Improved Adaptive Model Predictive Control / W. Chen et al. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 110342-110360. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3321692>.
- [6] AC Ship Microgrids: Control and Power Management Optimization / M.D.A. Al-Falahi et al. *Energies*. 2018. Vol. 11(6). Article 1458. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061458>.
- [7] AI-Driven Predictive Maintenance in Modern Maritime Transport-Enhancing Operational Efficiency and Reliability / Simion D., Postolache F., Fleacă B., Fleacă E. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(20). Article 9439. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14209439>.
- [8] Hierarchical Control Design for a Shipboard Power System With DC Distribution and Energy Storage Aboard Future More-Electric Ships / Jin Z., Meng L., Guerrero J.M., Han R. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14(2). Pp. 703-714. DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2772343>.
- [9] Artificial Intelligence in Maritime Cybersecurity: A Systematic Review of AI-Driven Threat Detection and Risk Mitigation Strategies / T. Miller et al. *Electronics*. 2025. Vol. 14(9). Article 1844. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14091844>.
- [10] Utilizing AI for Maritime Transport Optimization. URL: <https://cmr.berkeley.edu/2024/12/utilizing-ai-for-maritime-transport-optimization/> (date of access 02.04.2025).
- [11] AI Applications to Enhance Resilience in Power Systems and Microgrids. A Review / Y. Zahraoui et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(12). Article 4959. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16124959>.
- [12] Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications / Durlik I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(18). Article 8420. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188420>.
- [13] Leveraging extreme scale analytics, AI and digital twins for maritime digitalization: the VesselAI architecture / L. Ilias et al. *Frontiers in Big Data*. 2023. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2023.1220348>.
- [14] Machine Learning in Maritime Safety for Autonomous Shipping: A Bibliometric Review and Future Trends / J. Xue et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13(4). Article 746. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13040746>.
- [15] Gómez Ruiz M.Á., de Almeida I.M., Pérez Fernández R. Application of Machine Learning Techniques to the Maritime Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11(9). Article 1820. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11091820>.

Стаття надійшла 16.05.2025

Стаття прийнята 20.06.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Simanenkov A.L., Samoilov S.O. Symbiosis of artificial intelligence and ship's automated electrical energy systems: present and future. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 191-199. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336376>.

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 331.45

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336385

ВИЗНАЧЕННЯ ТЯЖКОСТІ НАСЛІДКІВ ВИБУХУ ПАЛЬНОГО НА АВТОЗАПРАВНОЇ СТАНЦІЇ

Цопа В.А.	д-р техн. наук, професор, Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Дерюгін О.В.	канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2456-7664 , e-mail: deryugin_o@ukr.net ;
Забеліна В.А.	аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7678-7917 , e-mail: vprotsyuk@gmail.com ;
Чеберячко Л.М.	аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2685-7809 , e-mail: lida_cheb@ukr.net

Мета дослідження. Визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на автозаправній станції (АЗС). **Матеріали і методи.** Для визначення шкали тяжкості наслідків від вибуху пального використовували метод ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) – спеціалізовану програму, розроблену для надання персоналу служб реагування на надзвичайні ситуації оцінки просторового масштабу деяких поширених небезпек, пов'язаних із розливами хімікатів, пожеж, вибухів. **Результати.** Визначено тяжкість наслідків від вибуху небезпечної речовини на основі розрахунку радіусів зон ураження інфраструктури організації та цивільної інфраструктури, персоналу та цивільного населення, забруднення навколишнього середовища від чотирьох вражаючих чинників вибуху: повітряної ударної хвилі, потужності теплового випромінювання, механічного впливу осколків і фрагментів, обсягу газоподібних продуктів, що виділяються при вибуху. Запропоновано для визначення радіусів зон ураження для конкретного підприємства провести моделювання вибуху пального за різними сценаріями, використовуючи програму ALOHA, яка дозволяє розрахувати зони розповсюдження ударної хвилі, інтенсивності випромінювання, забруднення навколишнього середовища. **Наукова новизна** полягає у встановленні взаємозв'язку між радіусом ураження ударною хвилею, потужністю теплового випромінювання, забрудненням шкідливими газами та тяжкістю наслідків від вибуху пального з критерієм неприйнятності ризику – межі максимальної небезпечної зони ураження від вражаючих чинників вибуху. **Практичне значення** полягає у розробці моделі причинно-наслідкових взаємозв'язків між небезпекою, небезпечною подією і наслідками для визначення тяжкості наслідків вибуху пального на основі моделювання зон ураження інфраструктури, персоналу та навколишнього середовища.

Ключові слова: автозаправна станція, вибух, наслідки, моделювання.

Постановка проблеми

Для оцінювання ризику безпеки потрібно дві складові: ймовірність настання небезпечної ситуації (в даному випадку – вибух небезпечної речовини) і тяжкості наслідків від її настання [1]. При визначенні ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків користуються статистичними даними щодо настання небезпечної події і наслідків, до яких вона призводить [2]. При цьому, виходячи із прийнятої моделі оцінювання ризиків для ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків, встановлюють інтервали чи шкали, які дозволяють встановлювати ступінь впливу безпеки [3]. Щільність інтервалу чи діапазон шкали залежить від заданої достовірності оцінювання ризику. Головною умовою для побудови інтервалів чи шкал ймовірності та тяжкості наслідків являється їх зрозумілість для користувачів [4]. Найчастіше використовують

п'ять інтервалів [5]. Наприклад, для ймовірності настання небезпечної події – це не більше ніж один раз на день; не більше ніж один раз на тиждень; не більше ніж один раз на місяць; не більше ніж один раз на півроку; не більше ніж один раз на рік. Тяжкість наслідків від настання небезпечної події визначають за критерієм втрати життя і здоров'я людини: не більше ніж одна смерть або групові тяжкі травми; не більше ніж одна тяжка травма або групові середні травми; не більше ніж одна середня травма або групові легкі травми; не більш ніж одна легка травма або групові забиття; не більш ніж одна без наслідків. Разом з тим, наслідки від настання небезпечної події – це комплексний показник, який характеризує матеріальні, фінансові, соціальні, економічні, екологічні втрати. Тому виникає необхідність в обґрунтуванні комплексного показника, який дозволив поєднати всі вище зазначені наслідки небезпечної події. Ситуація погіршується через відсутність достовірної

інформації щодо виникнення потенційно небезпечних смертельних зон ураження, які загрожують як людині, так інфраструктурі та навколишньому середовищу, що потребує проведення додаткових розрахунків. Іноді використовуються загальноприйняті методи з використанням довідкових даних [6], що характеризуються труднощістю. Все це зумовлює невиправдано значні витрати часу, а також при цьому не виключено можливість помилок у процесі підготовки та обробки даних. Тому пошук шляхів спрощення розрахунків для встановлення небезпечних зон від впливу небезпечної події дозволяє провести результативне оцінювання ризиків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботі [7] запропоновано методику оцінювання професійних ризиків на основі використання об'ємної матриці ризиків. Особливість цієї матриці полягає в тому, що для визначення рівня ризику запропоновано три шкали – ймовірність настання небезпечної події, наслідки від її настання і також схильність об'єкту до настання небезпечної події. Цікаво, що під схильністю автори пропонують розглядати залишковий рівень ризику від попередніх оцінок. Це дозволяє якісніше проводити оцінювання та обґрунтування необхідності використання захисних і запобіжних заходів. Разом з тим, показник схильність до настання небезпечної події потребує деталізації та розробки відповідних критеріїв для оцінювання різних небезпечних ситуацій.

В роботі [8] розглянута проблема розробки матриць для оцінювання ризиків. Автори звернули увагу на необхідність долучення працівників для визначення зручності використання запропонованих матриць на конкретному підприємстві. Важливим показником зручності являється її зрозумілість і простота використання. Разом з тим, виникало питання щодо визначення інтервалів для ймовірності настання небезпечної події і тяжкості наслідків. В публікації запропоновано вириховувати шість інтервалів, але як їх розраховувати, на жаль, інформація відсутня.

В роботах [9, 10] запропоновано рекомендації для визначення тяжкості наслідків небезпечної події з точки зору ранжування відхилень від нормального (стаціонарного) стану об'єкту з відображенням впливу непередбачених обставин. При цьому зазначається на необхідності враховувати альтернативи оцінки тяжкості наслідків від настання небезпечної події на основі економічних і матеріальних аспектів. Проте виникає питання щодо узгодженості різних підходів до визначення зазначеного показника для кількісної оцінки різних впливів непередбачених ситуацій.

В роботі [11] автори запропонували цікавий підхід до визначення ризику аварії на складах зберігання боєприпасів. Його відмінністю від відомих являється можливість прогнозування кількості небезпечних отруйних речовин, які можуть виділитися при вибухах і тим самим призвести до отруєння людей, які знаходяться в небезпечній зоні. Автори також розглянули

ситуацію, коли відбувається зважений рівномірний розподіл отруйних речовин на визначеній території, а також появи осередків високої концентрації шкідливих чинників з часом та під впливом різних природних факторів.

В роботі [12] автори розробили методику з розрахунку екологічних наслідків аварій на військових об'єктах. Її відмінністю від відомих, які оцінюють тільки прямі витрати від руйнації будівель, обладнання, забруднення навколишнього середовища, являється визначення витрат, які пов'язані з ліквідацією осередку аварії. Автори говорять, що фінансові суми, які виділяються на оплату проведення пожежно-рятувальних робіт, залучення різноманітної техніки та засобів, є доволі суттєвими і повинні бути враховані при оцінюванні ризику втрат.

В наступних роботах [13-15], які присвячені оцінюванню потенційного ризику від антропогенних аварій, в тому числі і на військових об'єктах, послідовно реалізується ідея визначення комплексної дії різних небезпечних чинників, притаманних вибуху. Запропоновані методики для розрахунку виділення шкідливих чинників в навколишнє середовище від продуктів загоряння, забруднення питної води, а також методики для визначення гострого токсичного ефекту, який проявляється в людей, що знаходились в аварійній зоні. Крім того, запропоновано підхід для визначення й хронічної інтоксикації та оцінку довгострокового впливу токсикантів на здоров'я людини.

Проведений аналіз досліджень і публікацій показав, що методики з розрахунку тяжкості наслідків від комплексної дії різних небезпечних чинників після вибуху не існує. У наведених роботах кожен з авторів пропонує оцінювання найбільш впливового небезпечного чинника, який має довгостроковий ефект.

Мета статті

Метою дослідження є визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на АЗС.

Виклад основного матеріалу

Пропонується для визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на АЗС скористатись моделлю краватка-метелик для визначення причинно-наслідкових зв'язків між безпекою (паливо) і небезпечною подією (вибух) та наслідками: втратою життя і здоров'я людей, руйнування інфраструктури, забруднення навколишнього середовища. Особливістю цієї моделі являється те, що вибух пального характеризується чотирьома вражаючими чинниками: повітряною ударною хвилею, потужним тепловим випромінюванням, обсягом газоподібних продуктів, що виділяється при вибуху, та розлітанням уламків від зруйнованих будівель (рис. 1). Звідси тяжкість наслідків можна визначити як зону сумарної дії всіх вражаючих чинників вибуху, яка призведе до загибелі та травмування людей і руйнування інфраструктури.

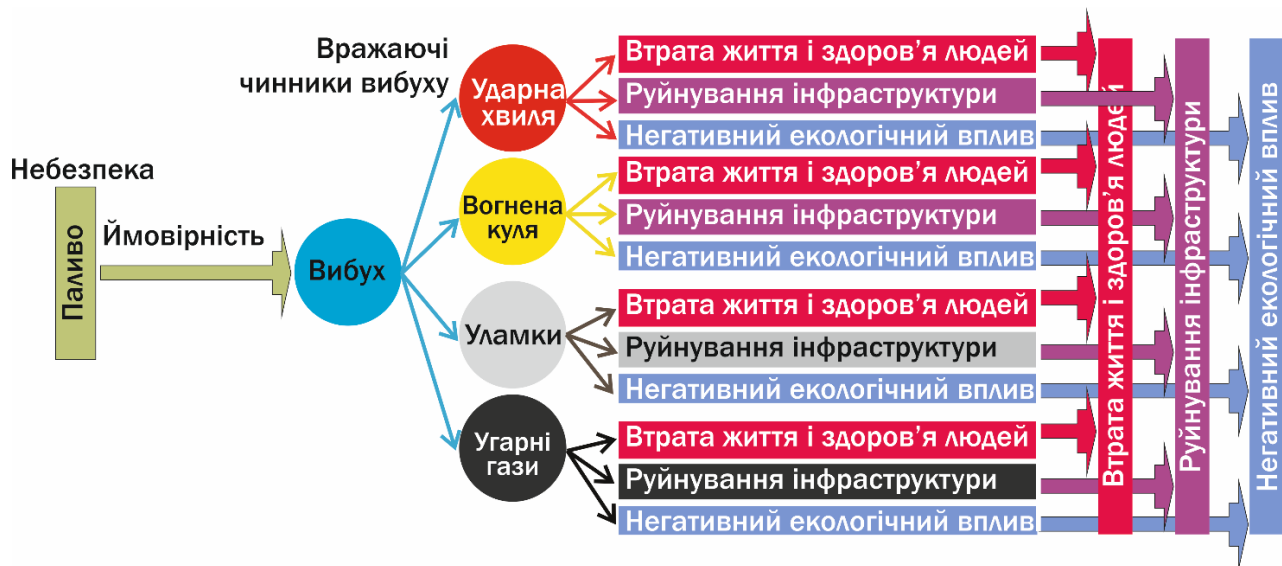


Рис. 1 – Модель ризику вибуху пального на АЗС

Кожен із зазначених вражаючих чинників має певну тяжкість травмування людей, руйнування інфраструктури та забруднення навколишнього середовища. Виникає необхідність у визначенні розмірів радіусів зон, в яких є неприйнятний рівень тяжкості травмування людей, руйнування інфраструктури та забруднення навколишнього середовища, щоб обрахувати потенційні збитки (тяжкість втрат) від вибуху небезпечної речовини.

Для оцінки радіусу зони дії ударної хвилі застосовується тротильовий еквівалент вибуху парогазового середовища W_T (кг), що визначається за умовами адекватності характеру та ступеня руйнування під час вибухів парогазових хмар, та для парогазових середовищ розраховується за формулою [16]:

$$W_T = \frac{0.4q^i}{0.9q_T}, \quad (1)$$

де 0,4 – частка енергії вибуху парогазового середовища, що витрачається безпосередньо на формування ударної хвилі; 0,9 – частка енергії вибуху тринітратолуолу (далі – ТНТ), що витрачається безпосередньо на формування ударної хвилі; q – питома теплота згоряння парогазового середовища, кДж/кг; q_T – питома енергія вибуху ТНТ, кДж/кг.

Виходячи з рівня тротильового еквіваленту вибуху, можна розрахувати радіус зони руйнування, границі якої характеризуються значеннями надлишкових тисків на фронті ударної хвилі ΔP . Радіус зони руйнування у загальному вигляді визначається за формулою [17]:

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}}, \quad (2)$$

де R – радіус зони ураження, м; K – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує вплив вибуху на об'єкт, $K = 3,8$ – повне руйнування будинків ($\Delta P \geq 100$ кПа); 5,6 – 50% будинків повністю зруйновані ($\Delta P \approx 70$ кПа); 9,6 – будинки непридатні для мешкання ($\Delta P = 28$ кПа); 28 – помірні руйнування, uszkodження внутрішніх неміцних перегородок ($\Delta P = 14$ кПа); 56 – незначні uszkodження будинків, розбито 10% скла ($\Delta P \leq 2$ кПа).

Розрахунок радіусу зон інтенсивності теплового випромінювання для «вогняної кулі», яка представляє собою великомасштабне дифузійне горіння, що реалізується у випадку розриву ємності з горючою рідиною, проводимо за формулою [17]:

$$q = E_f \times F_q \times \varphi, \quad (3)$$

де E_f – середньоповерхнева густина теплового випромінювання полум'я, кВт/м²; F_q – кутовий коефіцієнт опромінення; φ – коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу.

Для розрахунку зони забруднення газоподібними продуктами, що виділяються, розраховують глибину (Γ) за формулою [18]:

$$\Gamma = 34,2 \sqrt[3]{\frac{q^2}{PC_\phi^2 V^2}}, \quad (4)$$

де q – кількість небезпечної речовини, кг; PC_ϕ – токсична доза, мг хв/л; V – швидкість вітру, м/с.

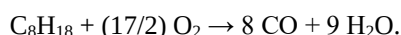
Площу зони фактичного забруднення розраховуємо за формулою [18]:

$$S_\phi = k \times \Gamma^2 \times T^{0.2}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від ступеню вертикальної стійкості атмосфери, який приймається рівним: 0,081 – при інверсії; 0,133 – при ізотермі; 0,235 – при конвекції; T – час, який пройшов після аварії.

При вибуху бензину до найбільш небезпечних газоподібних продуктів відноситься: оксид вуглецю та оксид азоту. При вибуху бензину утворюються різні газоподібні продукти, включаючи оксид вуглецю (CO) та оксиди азоту (NO_x). Для оцінки маси цих продуктів при вибуху 25 тонн бензину можна використовувати деякі припущення та спрощення.

Бензин складається переважно з вуглеводнів, таких як октан (C₈H₁₈). При повному згорянні 1 моля октану (C₈H₁₈) з утворенням CO:



Молярна маса октану (C₈H₁₈) ≈ 114 г/моль, молярна маса CO ≈ 28 г/моль, при повному згорянні 1 моля октану утворюється 8 молів CO. Маса CO, утвореного з 1 моля октану: 8 молів CO $\times 28$ г/моль = 224 г. Маса CO, утвореного з 1 кг октану: $(224 \text{ г} / 114 \text{ г}) \times 1000 \text{ г} \approx 1964 \text{ г}$. Маса CO, утвореного з 25 тонн бензину: $25 \times 10^6 \text{ г} \times 1964 \text{ г/кг} \approx 49100 \text{ кг}$.

Утворення NO_x залежить від температури та наявності азоту в повітрі. Припустимо, що частка NO_x становить приблизно 0.1% від маси палива (це дуже приблизне значення і може сильно варіюватися). Маса NO_x, утвореного з 25 тонн бензину:

$$25 \times 10^3 \text{ кг} \times 0.001 \approx 25 \text{ кг}.$$

Таким чином, при вибуху 25 тонн бензину маса оксиду вуглецю (CO) може скласти приблизно 49100 кг, а маса оксидів азоту (NO_x) – приблизно 25 кг. Ці значення є приблизними і можуть варіюватися в залежності від умов вибуху та складу бензину. Розрахунок провели за рекомендаціями, наданими в роботі [19].

Для розрахунку зазначених радіусів зон ураження інфраструктури від ударної хвилі, інтенсивності випромінювання та забруднення газоподібними продуктами від вибуху небезпечної речовини пропонується скористатись програмою ALOHA [20]. ALOHA пов'язує моделі потужності джерела з моделлю дисперсії. Щоб оцінити просторовий розмір легкозаймистих парів і вибухонебезпечних хмар парів, користувач повинен вибрати: тип та геометричні параметри резервуару, тип хімічної речовини, об'єм або масу речовини, а також інші параметри, необхідні для моделювання зон небезпеки (рис. 2).

ALOHA використовує графічний інтерфейс визначення небезпечних зон ураження вибуху (рис. 3). Область, де існує ймовірність впливу токсичних випарів, горючої атмосфери, надлишкового тиску внаслідок вибуху хмари пари або теплового випромінювання від пожежі, представлено графічно як зони загрози.

Atmospheric Options

Wind Speed is: 7 knots mph meters/sec Help

Wind is from: SW Enter degrees true or text (e.g. ESE)

Measurement Height above ground is: Help

OR enter value: 10 feet meters

Ground Roughness is: Help

Open Country Urban or Forest OR Input Roughness (Z₀):

Open Water

Select Cloud Cover: Help

complete cover partly cloudy clear

OR enter value: 7 [0 - 10]

OK Cancel

a)

Tank Size and Orientation

Select tank type and orientation:

Horizontal cylinder Vertical cylinder Sphere

Enter two of three values:

diameter 1.7011 feet meters

length 11

volume 25,000 liters cu meters

OK Cancel Help

б)

Рис. 2 – Вікна програми ALOHA для заповнення вхідних даних: навколишнього середовища (а) і характеристик резервуару (б)

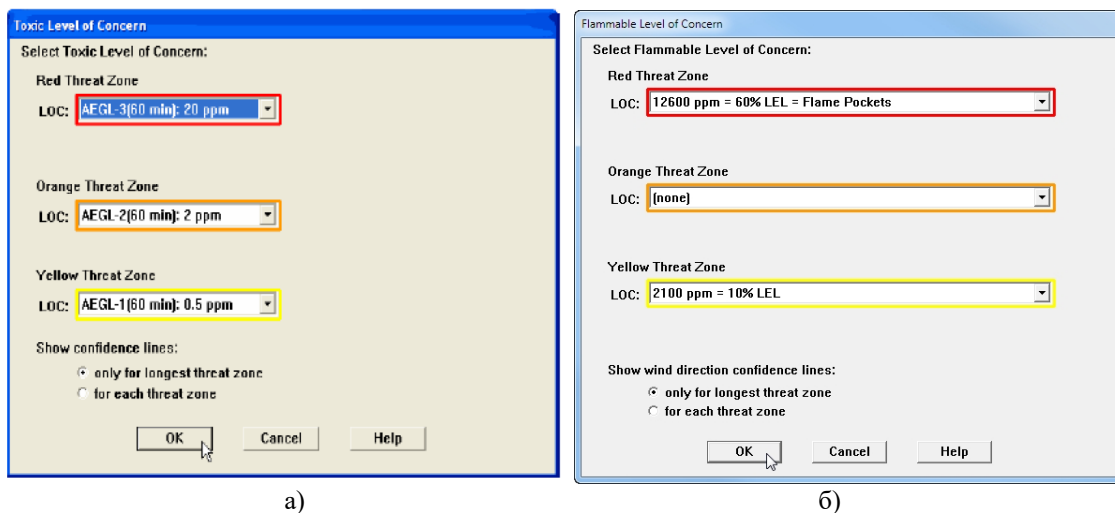


Рис. 3 – Вікна програми ALOHA для заповнення вхідних даних: щодо розрахунку небезпечних зон від забруднення навколишнього середовища (а) і теплового випромінювання (б) після вибуху



Рис. 4 – Карта з розміщення АЗС

В якості прикладу для оцінки ризиків викиду небезпечних речовин було використано АЗС (рис. 4), які вважаються об'єктами підвищеної небезпеки, оскільки технологічний процес пов'язаний з виникненням можливих надзвичайних ситуацій, таких як пожежі, вибухи та ін. при використанні пального.

З використанням ALOHA проведено моделювання наслідків вибуху бензину в горизонтальному циліндричному резервуарі бензовозу, який під'їхав на АЗС для його злиття в резервуар. Технічні

характеристики резервуару: діаметр: 1,7011 м, довжина: 11 м, об'єм: 25 000 л при різних умовах навколишнього середовища (температури повітря, яка змінюється від 0 до 30°C; швидкості вітру від 0 до 20 м/с).

Теоретичні результати дослідження.

На рис. 5 наведені результати моделювання наслідків вибуху резервуару автоцистерни з бензином. Розрахунок радіусів зон ураження ударної хвилі, інтенсивності випромінювання та забруднення газоподібними продуктами наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку радіусів зон ураження ударною хвилею ($\Delta P \geq 100 \text{ кПа}$), ураження від інтенсивності випромінювання тепла потужністю 2 кВт/м^2 , забруднення газоподібних речовин

№ з/п	Наповненість резервуару бензовозу (%)	Розміри радіусів зон ураження після вибуху резервуару бензовозу, м		
		З повним руйнуванням інфраструктури вибуховою ударною хвилею, ($\Delta P \geq 100 \text{ кПа}$)	З інтенсивністю випромінювання 2 кВт/м^2 , смертельно протягом 60 с	Із забруднення газоподібних речовин масою $10,83 \text{ т}$, які виділились після вибуху
1	100	18,4	170,9	106,1
2	60	16,4	150,6	95,1
3	40	13,4	130,1	83,7

Результати моделювання дозволяють розрахувати збитки, які зазначаються в [21], що заподіянні:

- функціонуванню інфраструктури як цивільної, так і виробничої з урахуванням витрат на локалізацію і ліквідацію аварії (3_i);

- навколишньому середовищу (знищення корисної флори, фауни, рослинності) (3_e);

- втрати життя і здоров'я персоналу промислового об'єкту (3_n).

Обговорення.

Прогнозування небезпечних ситуацій у контексті сучасного світу являється актуальною задачею, оскільки питання охорони навколишнього середовища та сталого розвитку стають надзвичайно важливими, зважаючи на утворення високих концентрацій шкідливих речовин на потенційно небезпечних об'єктах. Наприклад, під час техногенної аварії на автозаправних станціях, які призведуть до значного ризику втрати здоров'я або навіть життя як працівників, так і населення [22, 23]. АЗС розташовані поблизу міст і житлових районів, в охоронюваних ландшафтах, національних парках і поблизу джерел питної води, що підвищує ймовірність їх забруднення, руйнування інфраструктури та забудівель. Це вимагає розробки процесу оцінювання ризиків для навколишнього середовища від джерел небезпек, пов'язаних з діяльністю промислових об'єктів [24, 25].

Визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на АЗС на основі розрахунку радіусів зон ураження інфраструктури організації та цивільної інфраструктури, персоналу та цивільного населення, забруднення навколишнього середовища від чотирьох вражаючих чинників вибуху: повітряної ударної хвилі, потужності теплового випромінювання, механічного впливу осколків і фрагментів, обсягу газоподібних продуктів, що виділяються при вибуху в повітря, дозволяє розрахувати загальну суму фінансового збитку,

обґрунтувати доцільність застосування тих чи інших запобіжних чи захисних заходів на основі порівняння витрат на нове обладнання і збитків від настання небезпечної ситуації. Особливістю запропонованого підходу до визначення тяжкості наслідків являється можливість визначення максимальних фінансових збитків від всіх небезпечних процесів, які проводяться на АЗС. При цьому розрахунок збитків буде проводитись від настання найнебезпечнішої небезпечної події, яка буде характеризуватись найгіршими наслідками щодо руйнування інфраструктури, травмування та загибелі людей, забруднення території. В даній роботі наведено, один із прикладів настання небезпечної події вибуху пального при його зливів з автоцистерни, що дозволило встановити максимальну зону ураження і оцінити відповідні фінансові збитки. В подальшому, проаналізувавши всі можливі аварійні ситуації з вибухами, з'являється можливість визначення витрат та запровадження відповідних запобіжних заходів.

Аналізуючи наведену небезпечну подію, було встановлено, що небезпечним чинником, який призведе до максимальних збитків, являється зона ураження інфраструктури ударною хвилею, яка несе найбільшу кількість руйнувань і вражень персоналу АЗС. З іншого боку, комплексний підхід дозволяє визначити кумулятивний ефект від декількох небезпечних зон, що утворюються різними небезпечними чинниками, що дозволяє встановлювати критерії для визначення наслідків втрат.

Підкреслимо, що витрати на впровадження процесу оцінювання тяжкості наслідків вибуху пального автоцистерни можуть бути ефективними з інвестиційної точки зору, оскільки превентивне планування (заходи щодо запобігання серйозної аварії) вимагає значно менше коштів, ніж на витрати на засоби та заходи з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та відновлення до початкового стану будівель та території.

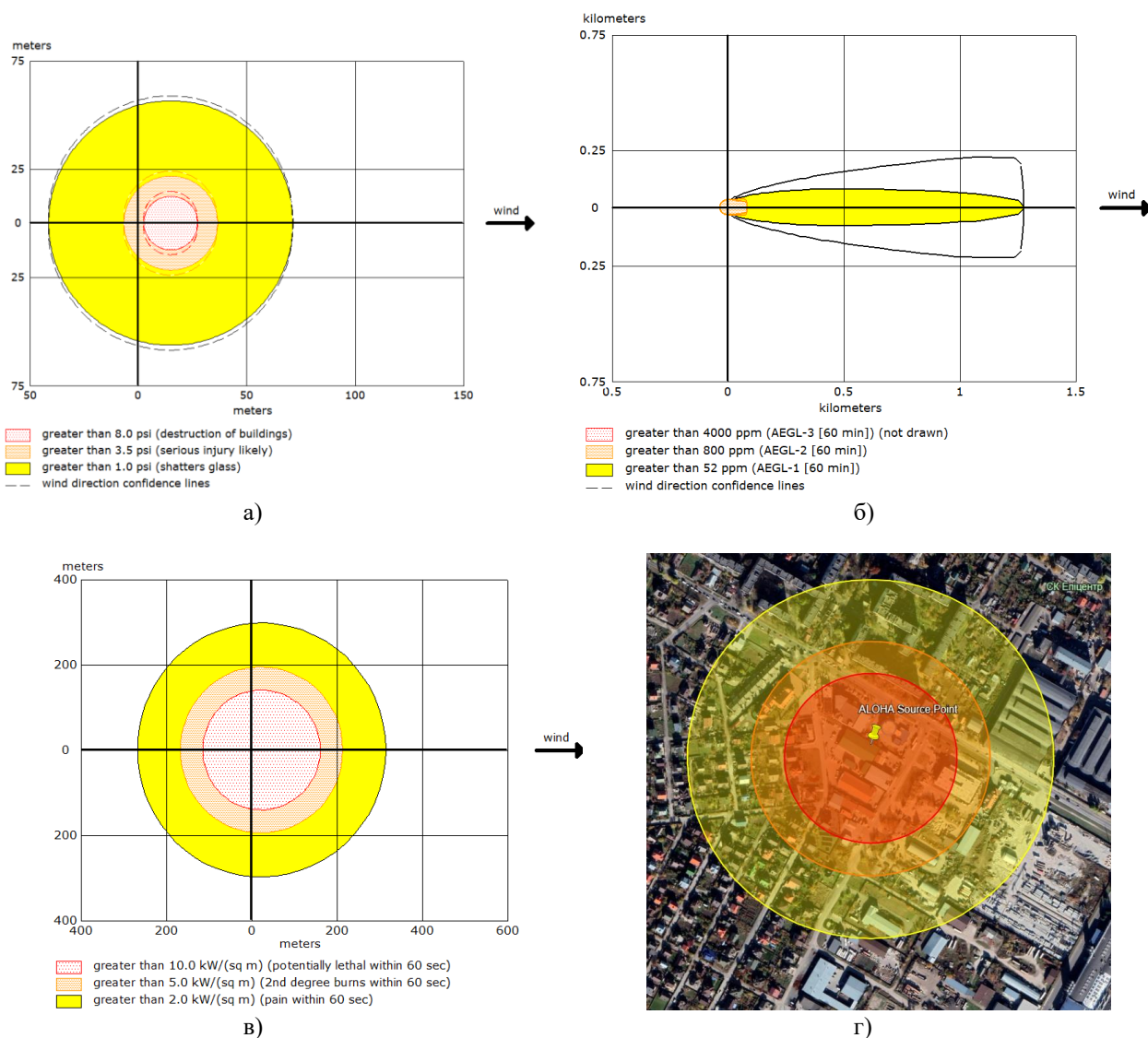


Рис. 5 – Результати поведеного розрахунку: площини розповсюдження ударної хвилі (а), інтенсивності випромінювання (б), забруднення навколишнього середовища (в), загальної площі пошкоджень на АЗС (г)

Висновки

Визначено модель тяжкості наслідків від вибуху небезпечної речовини – пального – на основі розрахунку радіусів зон ураження інфраструктури організації та цивільної інфраструктури, персоналу та цивільного населення, забруднення навколишнього середовища від чотирьох вражаючих чинників вибуху: повітряної ударної хвилі, потужності теплового випромінювання, механічного впливу осколків і фрагментів, обсягу газоподібних продуктів, що виділяються при вибуху в повітря. Запропоновано використовувати програму ALOHA для визначення зон ураження від вражаючих чинників вибуху для розрахунку тяжкості наслідків для конкретного підприємства за критерієм неприйнятності ризику – межі максимальної небезпечної зони ураження інфраструктури, персоналу та навколишнього середовища.

Перелік використаних джерел

- [1] Leveson N. A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science*. 2004. Vol. 42(4). Pp. 237-270. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X).
- [2] Citizens' Preparedness to Deal with Emergencies as an Important Component of Civil Protection / J. Kubás et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(2). Article 830. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19020830>.
- [3] Ak R., Bahrami M., Bozkaya B. A Time-based Model and GIS Framework for Assessing Hazardous Materials Transportation Risk in Urban Areas. *Journal of Transport & Health*. 2020. Vol. 19. Article 100943. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100943>.
- [4] Zhang C., Li Y., Zhu X. A Social-Ecological Resilience Assessment and Governance Guide for

- Urbanization Processes in East China. *Sustainability*. 2016. Vol. 8(11). Article 1101. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8111101>.
- [5] Paula H.M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. Pp. 773-782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058>.
- [6] Impact of Filling Stations: Assessing the Risks and Consequences of the Release of Hazardous Substances / Mäkkä K., Šiser A., Mariš L., Kampová K. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(1). Article 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010022>.
- [7] Цимбал Б. Робототехніка та штучний інтелект: заходи з безпеки та джерела загроз. *Комунальне господарство міст*. 2024. Вип. 3(184). С. 250-258. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-250-258>.
- [8] Jensen R.C., Bird R.L., Nichols B.W. Risk Assessment Matrices for Workplace Hazards: Design for Usability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Article 2763. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19052763>.
- [9] Дослідження техногенних загроз на підприємствах гірничо-металургійного комплексу та обґрунтування заходів безпеки / Володченко Н.В., Чеберячко Ю.І., Кружилко О.С., Репін М. В. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2024. Вип. 40(3-4). С. 18-23. DOI: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.40-3-4.2024.18-23>.
- [10] Ukraine, damage to the environment, environmental consequences of war / O. Angurets et al. 2023. 80 p. Режим доступу: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf> (дата звернення: 20.10.2024).
- [11] Deary M.E., Griffiths S.D. The Impact of Air Pollution from Industrial Fires in Urban Settings: Monitoring, Modelling, Health, and Environmental Justice Perspectives. *Environments*. 2024. Vol. 11(7). Article 157. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11070157>.
- [12] Methodology for assessment of public health emergency preparedness and response synergies between institutional authorities and communities / D.H. de Vries et al. *BMC Health Services Research*. 2020. Vol. 20(1). Article 411. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12913-020-05298-z>.
- [13] Sun Y., Yang Q., Peng X. Structural Damage Assessment Using Multiple-Stage Dynamic Flexibility Analysis. *Aerospace*. 2022. Vol. 9(6). Article 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9060295>.
- [14] Novik G.P., Abrahamsen E.B., Sommer M. On the importance of systems thinking in ERW (explosive remnants of war) risk management. *Progress in Disaster Science*. 2024. Vol. 21. Article 100309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100309>.
- [15] Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру : Постанова Кабінету Міністрів України від 4.06.2003 р. № 862. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-%D0%BF#Text> (дата звернення: 25.10.2024).
- [16] Chu E.W., Karr J.R. Environmental Impact: Concept, Consequences, Measurement. *Reference Module in Life Sciences*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.02380-3>.
- [17] Calculation of the environmental impact of the integration of industrial waste in concrete using LCA / de Brito J., Hafez H., Kurda R., Silvestre J. *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management. Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-Friendly Binders, and Life Cycle Assessment. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2022. Pp. 553-577. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821730-6.00020-6>.
- [18] A life cycle assessment of destruction of ammunition / K. Alverbro et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 170(2-3). Pp. 1101-1109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.092>.
- [19] ALOHA Software. URL: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software> (дата звернення: 20.10.2024).
- [20] Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні : Закон України від 12.07.2001 № 2658-III. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-%D0%BF> (дата звернення: 30.10.2024).
- [21] Корецька О., Жихарева В. Огляд міжнародних та вітчизняних стандартів оцінки вартості бізнесу в системі правового регулювання оціночної діяльності. *Економіка та суспільство*. 2023. Vol. 48. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-48-18>.
- [22] Malviya R.K., Rushaid M. Consequence Analysis of LPG Storage Tank. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5(2), part 1. Pp. 4359-4367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.003>.
- [23] Dandrieux A., Dimbour J.P., Dusserre G. Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006. Vol. 19(6). Pp. 683-689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.04.001>.
- [24] Dynamic Process and Damage Evaluation Subject to Explosion Consequences Resulting from a LPG Tank Trailer Accident / K. Wang et al. *Processes*. 2023. Vol. 11(5). Article 1514. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11051514>.
- [25] Evaluation of hazard range for the natural gas jet released from a high-pressure pipeline: A computational parametric study / Dong G., Xue L., Yang Y., Yang J. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010. Vol. 23(4). Pp. 522-530. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2010.04.007>.

DETERMINING THE SEVERITY OF THE CONSEQUENCES OF A FUEL EXPLOSION AT A GAS STATION

Tsopa V.	D.Sc. (Engineering), professor, International Management Institute, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Deryugin O.	PhD (Engineering), associate professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2456-7664 , e-mail: deryugin_o@ukr.net ;
Zabelina V.	postgraduate student, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7678-7917 , e-mail: vprotsyuk@gmail.com ;
Cheberiachko L.	postgraduate student, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2685-7809 , e-mail: lida_cheb@ukr.net

Research objective. Determining the severity of consequences from a fuel explosion at a gas station. **Materials and methods.** To determine the severity scale of the consequences of a fuel explosion, the ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) method was used - a specialized program designed to provide emergency response personnel with an assessment of the spatial scale of some common hazards associated with chemical spills, fires, explosions. **Results.** The severity of the consequences of an explosion of a hazardous substance is determined based on the calculation of the radii of the zones of damage to the organization's infrastructure and civil infrastructure, personnel and the civilian population, environmental pollution from four damaging factors of the explosion: air shock wave, thermal radiation power, mechanical impact of fragments and fragments, the volume of gaseous products released during the explosion. It is proposed to determine the radii of the zones of damage for a specific enterprise to conduct modeling of a fuel explosion under various scenarios using the ALOHA program, which allows you to calculate the zones of shock wave propagation, radiation intensity, environmental pollution. **Scientific novelty.** Consists in establishing the relationship between the radius of impact by the shock wave, the power of thermal radiation, pollution by harmful gases and the severity of the consequences of a fuel explosion with the criterion of unacceptability of the risk - the limit of the maximum dangerous zone of impact from the damaging factors of the explosion. **Practical significance** consists in developing a model of cause-and-effect relationships between hazard, hazardous event and consequences to determine the severity of the consequences of a fuel explosion based on modeling the areas affected by infrastructure, personnel and the environment.

Keywords: gas station, explosion, consequences, modeling.

References

- [1] N. Leveson, «A new accident model for engineering safer systems», *Safety Science*, vol. 42(4), pp. 237-270, 2004. doi: 10.1016/S0925-7535(03)00047-X.
- [2] J. Kubás, K. Bugánová, M. Polorecká, K. Petřlová, and A. Stolinová, «Citizens' Preparedness to Deal with Emergencies as an Important Component of Civil Protection», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19(2), article 830, 2022. doi: 10.3390/ijerph19020830.
- [3] R. Ak, M. Bahrami, and B. Bozkaya, «A Time-based Model and GIS Framework for Assessing Hazardous Materials Transportation Risk in Urban Areas», *Journal of Transport & Health*, vol. 19, article 100943, 2020. doi: 10.1016/j.jth.2020.100943.
- [4] C. Zhang, Y. Li, and X. Zhu, «A Social-Ecological Resilience Assessment and Governance Guide for Urbanization Processes in East China», *Sustainability*, vol. 8(11), article 1101, 2016. doi: 10.3390/su811101.
- [5] H.M. Paula, «Insights from 595 tank farm fires from around the world», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 171, pp. 773-782, 2023. doi: 10.1016/j.psep.2023.01.058.
- [6] K. Mäkkä, A. Šiser, L. Mariš, and K. Kampová, «Impact of Filling Stations: Assessing the Risks and Consequences of the Release of Hazardous Substances», *Applied Sciences*, vol. 14(1), article 22, 2024. doi: 10.3390/app14010022.
- [7] B. Tsymbal, «Robototekhnika ta shtuchnyi intelekt: zakhody z bezpeky ta dzherela zahroz» [«Robotics and artificial intelligence: safety measures and potential threats»], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, vol. 3(184), pp. 250-258, 2024. doi: 10.33042/2522-1809-2024-3-184-250-258. (Ukr.)
- [8] R.C. Jensen, R.L. Bird, and B.W. Nichols, «Risk Assessment Matrices for Workplace Hazards: Design for Usability», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, article 2763, 2022. doi: 10.3390/ijerph19052763.
- [9] N. Volodchenkova, Yu. Cheberiachko, O. Kruzhilko, and M. Repin, «Doslidzhennia tekhnohennykh zahroz na pidpriemstvakh hirnycho-metalurhiinoho kompleksu ta obgruntuvannia zakhodiv bezpeky» [«Research into technogenic threats at mining and metallurgical enterprises and justification of safety measures»], *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Labour protection problems in Ukraine*, vol. 40(3-4), pp. 18-23, 2024. doi: 10.36804/nndipbop.40-3-4.2024.18-23. (Ukr.)
- [10] O. Angurets, P. Khazan, K. Kolesnikova, M. Kushch, M. Černochova, and M. Havránek, *Ukraine, damage*

- to the environment, environmental consequences of war. 2023. [Online]. Available: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf>. Accessed on: October 20, 2024.
- [11] M.E. Deary, and S.D. Griffiths, «The Impact of Air Pollution from Industrial Fires in Urban Settings: Monitoring, Modelling, Health, and Environmental Justice Perspectives», *Environments*, vol. 11(7), article 157, 2024. doi: **10.3390/environments11070157**.
- [12] D. H. de Vries, J. Kinsman, J. Takacs, S. Tsoleva, and M. Ciotti, «Methodology for assessment of public health emergency preparedness and response synergies between institutional authorities and communities», *BMC Health Services Research*, vol. 20(1), article 411, 2020. doi: **10.1186/s12913-020-05298-z**.
- [13] Y. Sun, Q. Yang, and X. Peng, «Structural Damage Assessment Using Multiple-Stage Dynamic Flexibility Analysis», *Aerospace*, vol. 9(6), article 95, 2022. doi: **10.3390/aerospace9060295**.
- [14] G.P. Novik, E.B. Abrahamsen, and M. Sommer, «On the importance of systems thinking in ERW (explosive remnants of war) risk management», *Progress in Disaster Science*, vol. 21, article 100309, 2024. doi: **10.1016/j.pdisas.2023.100309**.
- [15] Metodyka otsinky zbytkiv vid naslidkiv nadzvychnykh sytuatsii pryrodnoho i tekhnolohynoho kharakteru [Methodology for assessing losses from the consequences of natural and man-made emergencies], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 4.06.2003 No. 862. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-%D0%BF#Text>. Accessed on: October 25, 2024.
- [16] E.W. Chu, and J.R. Karr, «Environmental Impact: Concept, Consequences, Measurement», *Reference Module in Life Sciences*, 2017. doi: **10.1016/B978-0-12-809633-8.02380-3**.
- [17] J. de Brito, H. Hafez, R. Kurda, and J. Silvestre, «Calculation of the environmental impact of the integration of industrial waste in concrete using LCA», in *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management. Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-Friendly Binders, and Life Cycle Assessment*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2022, pp. 553-577. doi: **10.1016/B978-0-12-821730-6.00020-6**.
- [18] K. Alverbro, A. Björklund, G. Finnveden, E. Hochschorner, J. Hägval, «A life cycle assessment of destruction of ammunition», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170(2-3), pp. 1101-1109, 2009. doi: **10.1016/j.jhazmat.2009.05.092**.
- [19] ALOHA Software. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>. Accessed on: October 20, 2024.
- [20] Pro otsinku maina, mainovykh prav ta profesiinu otsinochnu diialnist v Ukraini [On the valuation of property, property rights and professional valuation activities in Ukraine], Law of Ukraine dated 12.07.2001 № 2658-III. [Online]. Available: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-%D0%BF>. Accessed on: October 30, 2024.
- [21] O. Koretska, and V. Zhykharieva, «Ohliad mizhnarodnykh ta vitchyznianskykh standartiv otsinky vartosti biznesu v systemi pravovoho rehuliuвання otsinochnoi diialnosti» [«Overview of international and foreign standards for estimating business value in the system of legal regulation of valuation activities»], *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, vol. 48, 2023. doi: **10.32782/2524-0072/2023-48-18**.
- [22] R.K. Malviya, and M. Rushaid, «Consequence Analysis of LPG Storage Tank», *Materials Today: Proceedings*, vol. 5(2), part 1, pp. 4359-4367, 2018. doi: **10.1016/j.matpr.2017.12.003**.
- [23] A. Dandrieux, J.P. Dimbour, and G. Dusserre, «Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases?», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19(6), pp. 683-689, 2006. doi: **10.1016/j.jlp.2006.04.001**.
- [24] K. Wang, Y. Liu, H. Wang, X. Liu, Y. Jiao, and Y. Wu, «Dynamic Process and Damage Evaluation Subject to Explosion Consequences Resulting from a LPG Tank Trailer Accident», *Processes*, vol. 11(5), article 1514. doi: **10.3390/pr11051514**.
- [25] G. Dong, L. Xue, Y. Yang, and J. Yang, «Evaluation of hazard range for the natural gas jet released from a high-pressure pipeline: A computational parametric study», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23(4), pp. 522-530, 2010. doi: **10.1016/J.JLP.2010.04.007**.

Стаття надійшла 15.02.2025

Стаття прийнята 28.02.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Визначення тяжкості наслідків вибуху пального на автозаправній станції / Цопа В.А., Дерюгін О.В., Забеліна В.А., Чеберячко Л.М. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 200-209. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336385>.

УДК 614.74:519.8:658.5

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336391

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЇ ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ УМОВ МІНІМІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ДЖЕРЕЛІ ЇХ ВИНИКНЕННЯ – УЗАГАЛЬНЕНОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Волошин В.С.

д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: yvslshn52@gmail.com;

Бурко В.А.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

У статті зроблена спроба встановити реальні межі можливостей узагальненого технологічного процесу щодо засвоєння умов подолання стану термодинамічної двоєдності, як причини появи відходів у самому технологічному процесі. Запропонована методика оцінки термодинамічного стану узагальненого технологічного процесу за термодинамічними показниками дала змогу оцінити параметричні межі подолання стану термодинамічної двоєдності та забезпечення стійкої термодинамічної нерівноважності і незворотності в механізмах мінімізації відходів в рамках технологічного процесу. Встановлено параметричну залежність між основними термодинамічними показниками, що характеризують здатність узагальненого технологічного процесу поглинати додаткову енергію для переробки потенційних відходів в товарну продукцію, не порушуючи при цьому стабільності всього узагальненого технологічного процесу. Показано, що умовою подолання принципу термодинамічної двоєдності, як основи виникнення відходів узагальненому технологічному процесі, у напрямку їх мінімізації в самому технологічному процесі, є стан термодинамічної нерівноваженості для всіх компонентів матеріального кластера системи на межі її хаосу. Встановлено, що для будь-якого технологічного процесу на феноменологічній кривій у нижній межі нерівноваженості завжди існує робоча термодинамічна точка А, яка визначає здатність того чи іншого технологічного процесу до цілеспрямованої зміни структури всього сировинного кластеру, без порушення термодинамічної стабільності всієї системи. Показано, що відношення $E_w = 0,62E_0$ є не тільки граничною умовою фрактального хаосу в узагальненому технологічному процесі, а й умовою його стабільності, як об'єкта фрактально-кластерної моделі на межі хаосу. При цьому термодинамічний коефіцієнт r , що відображає відношення сумарної роботи по перетворенню всіх сировинних матеріалів в товарну продукцію до базового значення енергії в стаціонарному стані, не повинен перевищувати значення 0,35 для узагальненого технологічного процесу.

Ключові слова: промислові відходи, управління відходами, математичні методи, термодинамічна нерівноваженість, фрактали, кластери, узагальнений технологічний процес.

Постановка проблеми

Фрактально-кластерний підхід дозволяє розглядати сукупне виробництво різноманітної товарної продукції і супутних до них відходів як сукупну самоподібну, геометрично описану систему, здатну розташовуватися на межі фрактальності, коли послідовна термодинамічна нерівноваженість в системах здатна переходити в біфуркаційні відносини і навіть, при деяких умовах, в хаотичний стан. Розглянемо ці дослідження в тій частині, в якій вони відносяться до доказів сталого управління структурами матеріальних потоків, а саме можливостей до мінімізації відходів у самому технологічному процесі.

У той же час, той факт, що виробничі системи в своїй цілісності здатні розташовуватися на порозі фрактальності, вимагає методологічної обережності в таких підходах. У зв'язку з цим для нас важливим є обґрунтування такої ознаки, як проява самоподібності в певних параметрах узагальненого технологічного процесу, який здатний перебувати на межі хаосу в силу своєї кластерної структури і властивостей фрактальних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Неважко уявити певну сукупну систему виробництва в вигляді різноманітних технологічних процесів, в основі кожного з яких лежать матеріальні та енергетичні потоки, відомості про порядок їх взаємодії, умови стійкості, рівноважності і незворотності, в яких здійснюється виробництво товарної продукції (p) і утворення нових відходів (w) [1]. У такому уніфікованому стані будь-який технологічний процес може мати ознаки геометричного характеру самоподібності, наприклад, у вигляді графобудівних моделей [2], коли один і той же механізм діє в різних технологіях: від отримання сировини і напівфабрикатів до отримання товарної продукції в її різноманітності. Ті ж закономірності, за допомогою яких формується товарна продукція, є основою для отримання відходів [3]. Такі особливості повторюються як в цілому, для сукупної системи виробництва, так і для кожного технологічного процесу окремо. Однакові вихідні умови будь-якого технологічного процесу (енергія, потоки сировини, інформація про правила їх взаємодії, власне взаємодія сировини і енергії, і як наслідок – готова продукція та відходи), причинно-наслідкові зв'язки в такому переліку технологій роблять їх розвиток совоподібним

явищем як в ретроспективі, так і в перспективі. Це дає можливість вивчати такий узагальнений технологічний процес з позицій взаємодії енергетичних і матеріальних потоків, умов їх термодинаміки.

З точки зору своєї геометричної інтерпретації, сукупна виробнича система дозволяє використовувати для її аналізу метод фрактально-кластерного моделювання, викладений в роботах [4-6], де пропонуються математичні моделі для опису структури матеріальних потоків, характерних для ряду штучних систем [5], в тому числі і для отримання товарної продукції [6].

Мета статті

Встановити параметричні межі та умови подолання стану термодинамічної двоєдності та забезпечення стійкої термодинамічної невідновності і незворотності в механізмах мінімізації відходів у межах технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу

Беручи до уваги різноманіття існуючих технологічних процесів отримання товарної продукції, нескінченне число фізичних, хімічних, механічних та інших явищ, що лежать в їх основі, приймемо поняття Узагальненого Технологічного Процесу (УТП),

спрямованого на отримання певної сукупної продукції і утворення відходів, у вигляді об'єкта управління типу «чорний ящик» і його графопобудівну моделі (рис. 1). На вході такої моделі ми бачимо кластероподібні матеріальні потоки сировини та енергії, а на виході – трансформовані матеріальні потоки у вигляді готової продукції (p) та відходів (w). У такому об'єкті не врахована інформація про порядок реалізації УТП та його внутрішні механізми і закономірності.

Така задача є близькою до проблеми взаємодії зовнішньої енергії певної якості з наперед визначеними структурами сировини [2]. Останні нескладно представити у вигляді декількох уніфікованих кластерів ресурсного характеру виробничої системи, наприклад:

- компоненти сировинної бази J_n з ваговою функцією C_n ;
- компоненти продукційної бази J_p з ваговою функцією C_p ;
- компоненти бази відходів J_w з ваговою функцією C_w ;
- перехідні компоненти J_{-w} з ваговою функцією C_{-w} ;
- компоненти додаткової товарної продукції J_{pw} , що отримується з відходоутворюючої частини сировини.

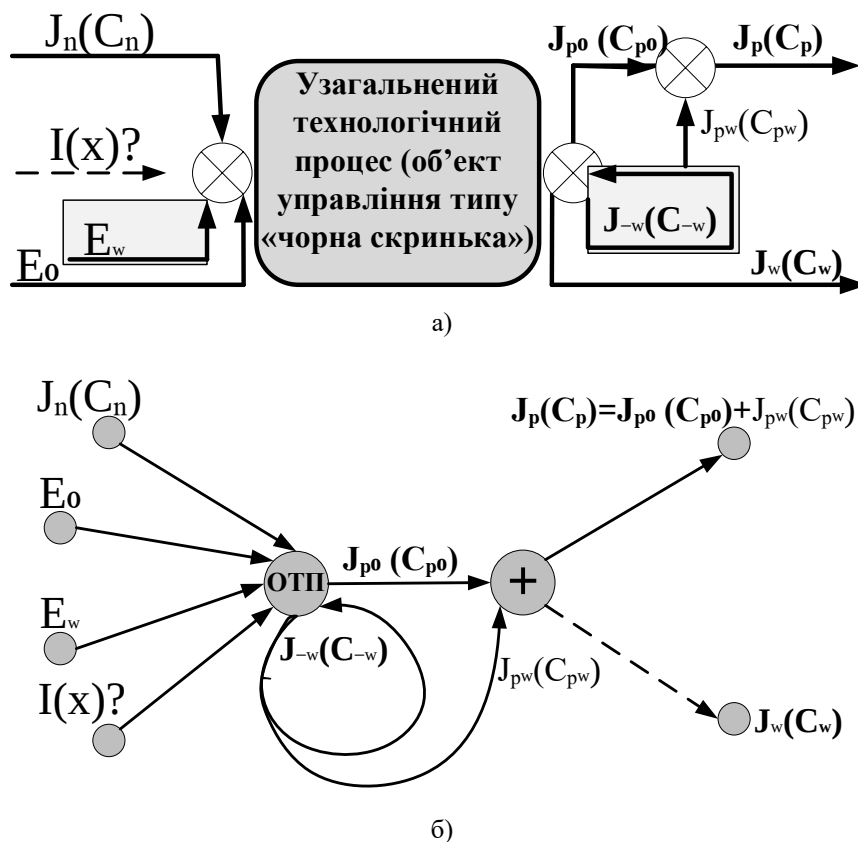


Рис. 1 – Схема (а) узагальненого технологічного процесу (УТП) і його графопобудівна моделі (б) в системі управління типу «чорний ящик» (затінені ділянки вказують на механізми подолання принципу термодинамічної двоєдності в УТП)

Ці матеріальні потоки можуть відрізнятися лише по відношенню до енергії самого УТП, який, в свою чергу, утворює цілком впізнавані кластери енергетичного характеру E_m , ($m = 0, p, w$), а саме:

- базові види енергії для технологічного процесу $E_p \sim E_0$, призначені для переробки компонентів J_p в товарну продукцію;

- модифіковані або додаткові види енергії, в заданих якісних і аргументованих пропорціях $E_w \approx 0,62E_0$, призначені для переробки компонентів сировини J_w

Залежність для змінної ентропії системи, близької до стану термодинамічної рівноваги, від величини феноменологічного коефіцієнта λ в загальному випадку представлена на рис. 2, де можна відзначити області, пов'язані з різноманітним пропорцій між товароутворюючими $J_p = \text{const}$ і відходоутворюючими $J_w = \text{const}$ матеріальними потоками, і, як результат, – з теоретично безвідходним виробництвом [3]. В тому числі, в залежності від термодинамічного показника $r = \frac{(J_p X_p + J_w X_w)}{E_0}$, який відображає співвідношення сумарної роботи по перетворенню всього сировинного кластера ($J_p + J_w$) до базового рівня зовнішньої енергії E_0 . До цієї залежності як до показника мінімізації промислових відходів ми звернемося в заключній частині нашої роботи з метою встановлення параметричної залежності між основними термодинамічними показниками, що характеризують здатність УТП до сприйняття додаткової енергії для переробки потенційних

відходів J_w в товарну продукцію, не порушуючи при цьому стійкості всього УТП.

У випадку з УТП, що ми розглядаємо, кластерів може бути два: перший відображає два енергетичні потоки E_0 і E_w , а другий являє собою систематизовані матеріальні потоки J , що відносяться послідовно до J_n ; J_p ; J_w ; J_{-w} ; J_{pw} (їх п'ять).

Узагальнений ваговий коефіцієнт всіх ресурсів, що входять у виробничу систему, структуровану за кластерами, дорівнює

$$C_0 = \sum k_1 C_{1,2} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 k_1 k_2 C_{1,2}, \quad (1)$$

де: $C_{1,2}$ – сума вагових коефіцієнтів для різних ресурсів, що відносяться до першого та другого кластерів; $k_{1,2}$ – пропорційна частка ресурсів, що відносяться до кожного кластера; C_0 – сумарний ресурс системи в кількісному вираженні вагових коефіцієнтів.

На причесність УТП до області, що межує з фрактальністю самоподібних систем, свідчать результати досліджень 90 технологічних процесів і 103 їх модифікацій, виконаних авторами, результати яких описані методом огинаючих кривих і представлені на рис. 3. А саме, підкреслюється граничний зв'язок області гладкої термодинамічної невідновності з такими явищами, як парні і множинні парні біфуркації, омбіліки та хаос. Це дозволяє застосувати до поняття «промислові відходи» в їх загальновідомому різновиді такі показники, як динаміка зміни ентропії у вигляді показника відходоутворення, наведеного в роботах [1, 3]

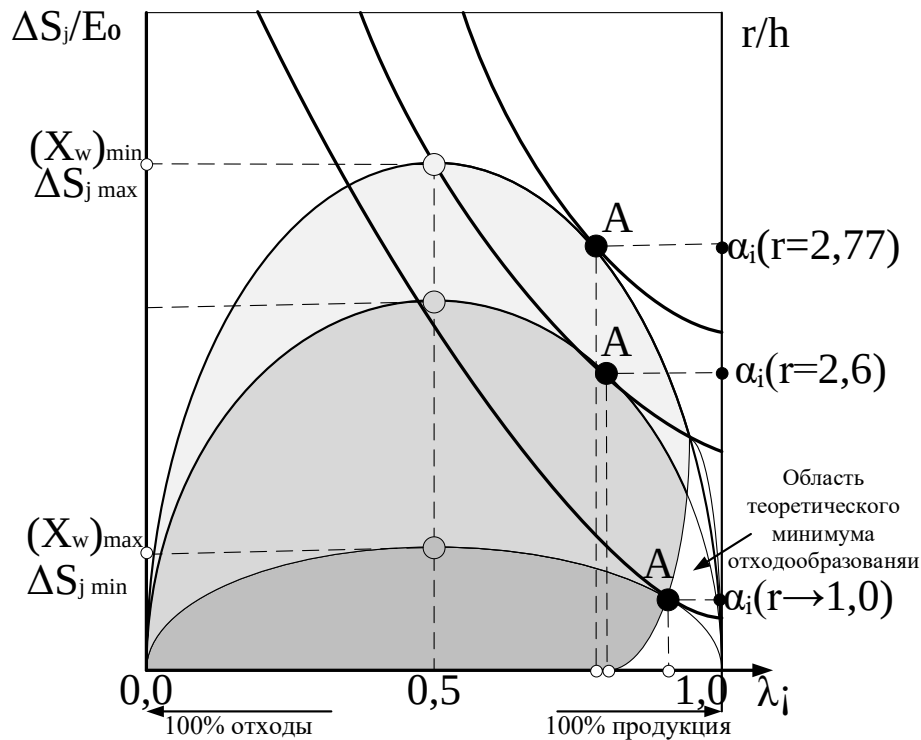


Рис. 2 – Термодинамічні закономірності в області розрахункового теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологічних процесах

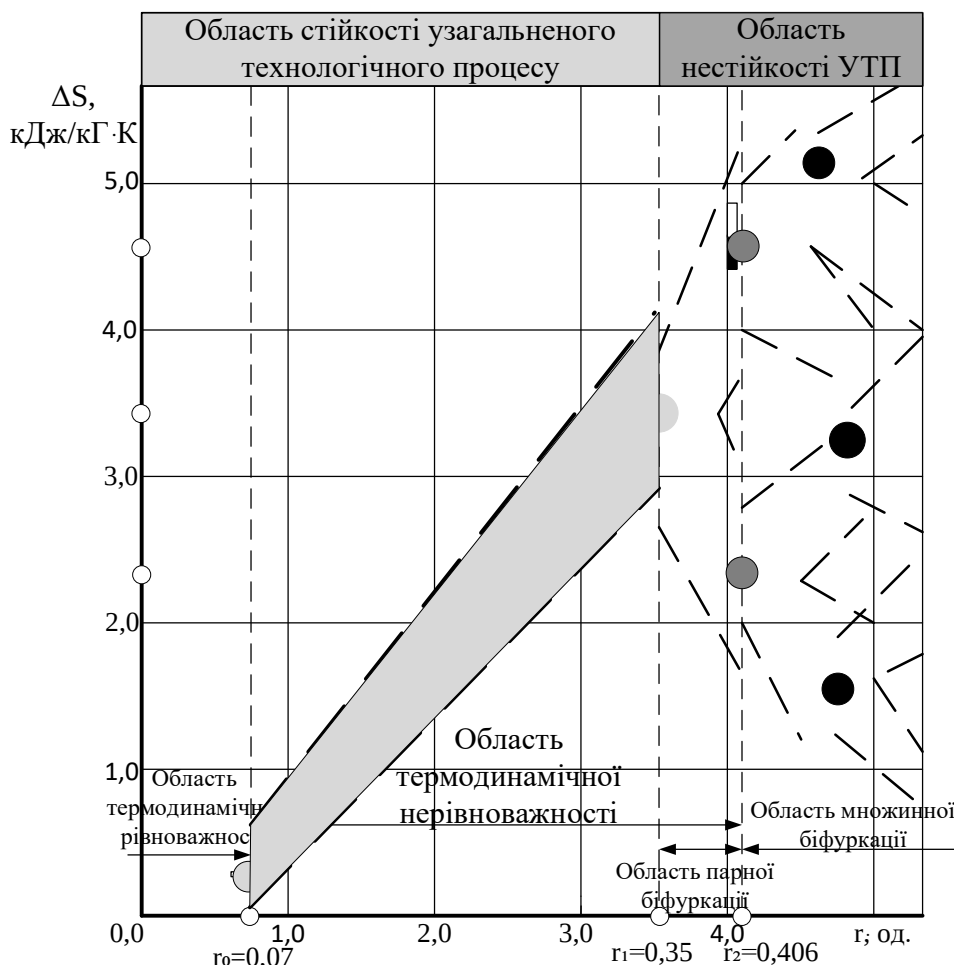


Рис. 3 – Межі огинаючих кривих для розрахункових даних у граничних областях фрактальності узагальненого технологічного процесу у порівнянні зі станом його термодинамічної стійкості

Без забезпечення стійкого стану в разі впровадження додаткового джерела енергії, призначеного для переробки тієї частини сировинного кластера, яка в звичайному стані направляється у відходи даного виробництва, технологічний процес не здатний нормально функціонувати. Стійкість виробничої системи визначається в цілому щодо існуючої структури сировини, при постачанні в систему додаткової енергії необхідної якості і в необхідній кількості, відсутністю флуктуацій енергетичного кластера. В даному випадку це співвідношення $E_0 + E_w = E_0(1 + 0,62)$ у початковий момент часу (τ_0) переробки основних компонентів сировинного кластера. В якості критерія стійкості умовних відходоутворюючих систем припустимо квадратичне змінне значення – швидкість приросту ентропії [7].

Стійкість дисипативних структур, згідно досліджень І. Пригожина, пов'язана з позитивними значеннями надлишкового виробництва ентропії δS у вигляді чисельного розв'язання рівнянь у наступній послідовності

$$+\delta S_n = \delta \langle C_n \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_n \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{n,E_0} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{n,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{n,E_w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{n,E_w} \rangle} \right\}; \quad (2)$$

яке надає інформацію про стійкість традиційної технології в цілому;

$$+\delta S_p = \delta \langle C_p \rangle \frac{\partial S}{\partial \langle J_p \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{p,E_0} \rangle \frac{\partial S}{\partial \langle J_{p,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{p,E_w} \rangle \frac{\partial S}{\partial \langle J_{p,E_w} \rangle} \right\}; \quad (3)$$

яке надає інформацію про стійкість технологічного процесу по відношенню до продукції, що випускається в ньому;

$$+\delta S_w = \delta \langle C_w \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_w \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{w,E_0} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{w,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{w,E_w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{w,E_w} \rangle} \right\}; \quad (4)$$

яке надає інформацію про стійкість технологічного процесу по відношенню до відходів, що утворюються в ньому. І наостанок,

$$+\delta S_{-w} = \delta \langle C_{-w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{-w} \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{-w,E_0} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{-w,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{-w,E_w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{-w,E_w} \rangle} \right\}; \quad (5)$$

найбільш цікавий для предмета нашого дослідження варіант, коли чисельне рішення показує

ступінь стійкості виробничої системи, в якій в певних кількостях присутня додаткова енергія E_w , що здатна до цілеспрямованого перетворення матеріального потоку $J_w \rightarrow J_{-w} \rightarrow J_{pw}$. Кожне з цих рівнянь дає інформацію у відносній формі про залежність швидкості зміни ентропії δS , пов'язаної з переробкою не тільки тієї частини сировини, яка потрапляє до товарної продукції (3), але і для другої частини сировини, яка потрапляє у відходи (4), і для тієї ж частини сировини, якщо вона піддається додатковій переробці в умовах технологічного процесу за рахунок додаткової енергії (5). Результати таких досліджень показані на рис. 4.

Швидкість зміни ентропії, що редується до зовнішньої енергії, для УТП, який відноситься до одного з

видів промислового виробництва, тим менше, чим більше дестабілізованим є енергетичний режим цього процесу при введенні додаткового джерела енергії (показник $h \sim (E_0 + E_w)/E_0 = (E_0 + kE_0)/E_0 = 1 + k$, де k – граничний показник співвідношення додаткової енергії E_w , здатної цілеспрямовано змінювати відходоутворюючу частину сировини J_w по відношенню до основної зовнішньої енергії технологічного процесу E_0 , спрямованого на отримання основного товарного продукту. Нас цікавить значення цього коефіцієнта в межах $k \approx 0,62$, як обмеження по відношенню до сумарної зовнішньої енергії ($E_0 + E_w$), здатної цілеспрямовано змінюватися всього сировинної кластера.

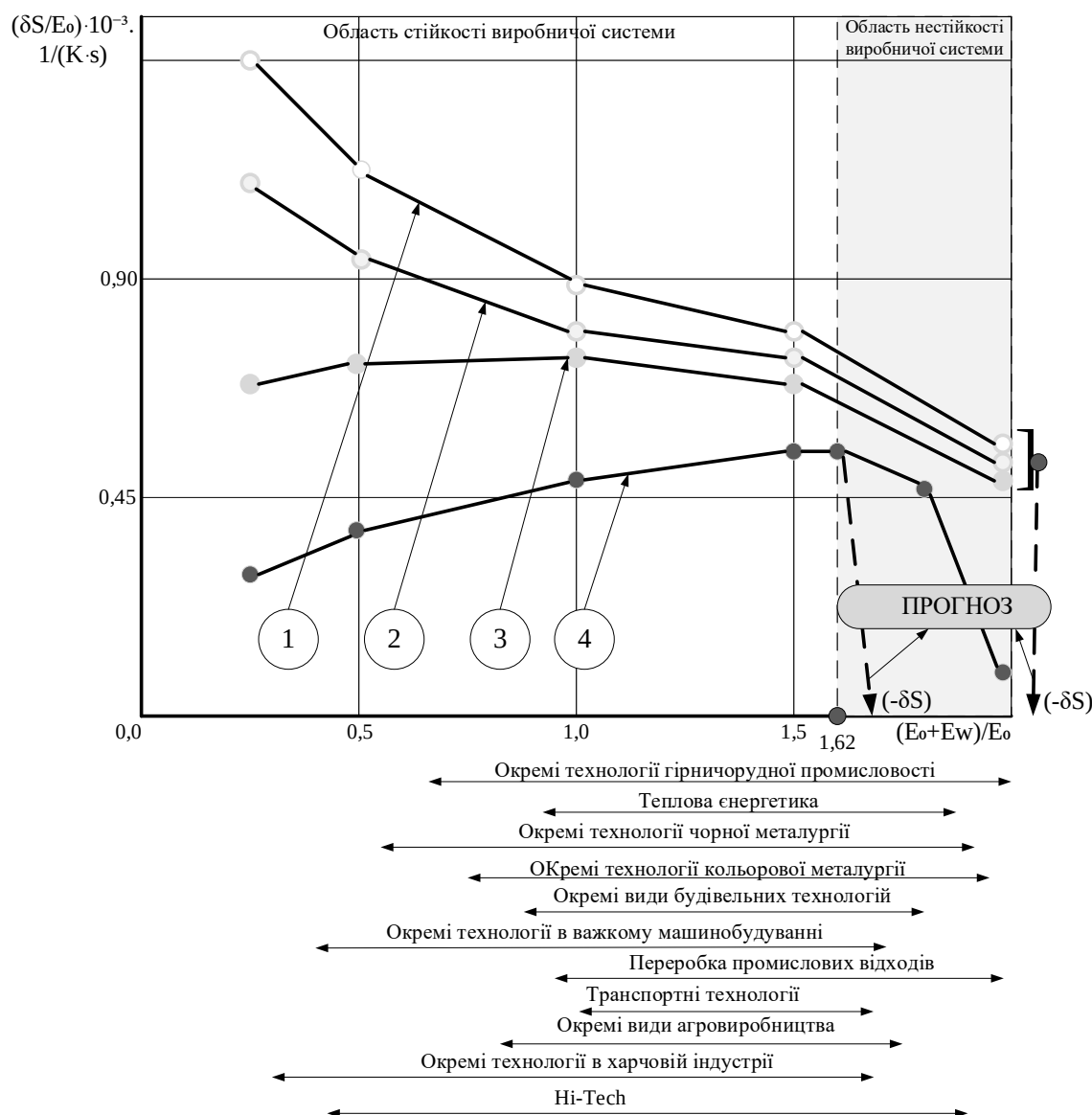


Рис. 4 – Умови сталості відходоутворюючої виробничої системи в технологіях мінімізації відходів у джерелі утворення - технологічному процесі: 1 - відношення до повної сировинної бази технологічного процесу; 2 – відношення до компонентів сировини, з якого отримують товарну продукцію; 3 – відношення до компонентів сировини, з яких отримують відходи; 4 – співвідношення до компонентів частини сировини, які підпадають до впливу додаткової енергії E_w

Розраховані дані підтверджують існування граничної умови забезпечення мінімізації утворення відходів в рамках сталого технологічного процесу, що виражається співвідношенням $E_w = 0,62 \cdot E_0$, вище якого виробнича система для більшості галузей в стандартному виконанні, враховуючи втрату стійкості, не тільки не в змозі цілеспрямовано впливати на ту частину J_w сировинного кластера, що цікавить нас і відповідає за формування стандартної номенклатури відходів конкретного виробництва (заштрихована ділянка, див. рис. 3), а й до отримання товарної продукції в цілому.

Оптимальний варіант можливий тоді і тільки в тому випадку, якщо зміна стану кожної з складових сировинної бази досягається за рахунок мінімально допустимого впливу певного виду якісно зміненої базової енергії або додаткової енергії ззовні без підвищення ентропії самої системи за вищеописаним алгоритмом. Звичайно, це ідеальний кінцевий результат, якого не завжди вдається досягти в зв'язку з надзвичайною складністю порушення умови термодинамічної двоєдності в конкретній виробничій системі, подолати яку можна лише за допомогою деяких більш складних закономірностей.

Результатом цього дослідження може стати ще один показник, який відповідно до отриманої раніше феноменологічної кривої (див. рис. 2) повинен показати єдність теоретичного дослідження і практичної складової технологічного процесу, його енергетичних компонентів, що включають як базову енергію, так і додаткову енергію, призначену для переробки всього

сировинного кластера. Такий показник повинен одночасно вказувати і на межу існування термодинамічної двоєдності в технологічному процесі, і на межу термодинамічної нерівноваги, як критерій такої двоєдності, і, таким чином, повинен бути певним показником досяжності ідеального кінцевого результату – теоретичного мінімуму відходів, які може виробляти досліджуваний технологічний процес. Таким чином, існуючі загальні властивості параметрів, показаних в роботі, повинні допомогти порівняти термодинамічні характеристики УТП з енергетичними параметрами, що дозволяють системі змінювати стан всього матеріального кластера, так і визначити межі такої взаємодії. Вихідні дані для такого аналізу представлені в таблиці 1.

При певних припущеннях, які можуть вплинути на точність нашого аналізу, але тим не менше приведуть до бажаного результату, ми запишемо

$$\frac{r}{h} = \frac{J_p X_p + J_w X_w}{E_0 + E_w} = \frac{J_p X_p + J_w X_w}{E_0(1+k)} = \frac{J_p X_p + J_w \frac{\lambda X_p}{1-\lambda}}{1,62 E_0} = \alpha(1 + \beta \frac{\lambda}{1-\lambda}) \quad (6)$$

де: $\alpha = 0,62 J_p X_p / E_0 = \text{const}$ – базовий показник енергетичного кластера УТП; $\beta = J_w / J_p = \text{const}$ – базовий показник компонентного стану товарного кластера УТП; r/h – параметр, що характеризує термодинамічні сили, здатні до перетворення потенційного відходу J_w в технологічному процесі на межі гладкої термодинамічної невірноваженості в ньому.

Таблиця 1

Параметричні дані для аналізу допустимих значень системи УТР на межі хаосу

№№	Найменування показників	Означення показників
1	Феноменологічний коефіцієнт, що визначає відносність прикладання певних сил X_0 та X_w і здійснену при цьому роботу A_0 та A_w відповідно.	$\lambda = \frac{X_w}{X_0 + X_w}$
2	Термодинамічний показник, що відображає відношення сумарної роботи щодо перетворення всієї сировини $(J_0 + J_w)$ в товарну продукцію до базового значення енергії E_0 .	$r = \frac{(J_p X_p + J_w X_w)}{E_0}$
3	Граничний показник відношення додаткової енергії E_w , здібної до цілеспрямованої зміни відходоутворювальної частини сировини J_w , до базової зовнішньої енергії технологічного процесу E_0 , спрямованої на отримання основної товарної продукції	$h = (E_0 + E_w) / E_0 = (E_0 + k E_0) / E_0$
4	Параметр термодинамічної сили, здатної до перетворення потенційного відходу на межі гладкої термодинамічної невірноваженості УТП	$\frac{r}{h} = \alpha(1 + \beta(\frac{\lambda}{1-\lambda}));$ $\alpha = 0,62 J_p X_p / E_0;$ $\beta = J_w / J_p.$

Співставлення залежностей $\Delta S/E_0$ для відходоутворюючого УТП та параметричного показника r/h від параметру λ показано на рис. 2. Загальне рівняння для таких залежностей

$$(J_p X_p + J_w X_w) \lambda (1 - \lambda) = 0,62 J_p X_p [1 + \frac{J_w (1-\lambda)}{J_p \lambda}], \text{ або} \quad (7)$$

$$\gamma \lambda (1 - \lambda) = \alpha [1 + \beta \frac{(1-\lambda)}{\lambda}], \text{ або} \quad (8)$$

$$\lambda^3 - \lambda^2 + \frac{\alpha(1-\beta)}{\gamma} \lambda + \frac{\alpha\beta}{\gamma} = 0. \quad (9)$$

Тут $\alpha = 0,62 J_p X_p = \text{const}$; $\beta = J_w / J_p = \text{const}$; $\gamma = J_p X_p + J_w X_w = f(X_w)$. Для вирішення рівняння скористаємося канонічною формулою Кардано [8] $\lambda^3 + p\lambda + q = 0$, змінивши його змінну на $\lambda = y + \Delta(X_w)$, і отримавши дискримінант $\Delta = \Delta_1^2 - 4\Delta_0^3$. Коріння рівняння визначаються як

$$y_{1,2,3} = \sqrt[3]{\sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2} - \frac{q}{2}} + \delta^k \sqrt[3]{\frac{-q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}}$$

де $k=1,2,3$, δ – кубічний корінь з одиниці; $\Delta_0 = p^2 + 4q$; $\Delta_1 = 2p^3 + 27q^2$

Розв'язанням рівняння (9) є один дійсний і два уявних кореня. Ми беремо до уваги лише дійсні значення кореня в діапазоні змін $0 \leq \lambda \leq 1$. Повернемося до рис. 2 і покажемо, що під робочою точкою А розуміється межа, що розділяє параметри УТП, при якій система здатна змінювати частину сировини J_w зі стану, характерного для відходів, на стан товарної продукції без порушення загальної стійкості термодинамічної системи і вказує відношення цього стану до розрахункового значення теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів в самому технологічному процесі. Таке рішення стає об'єктивним результатом, за яким можна судити про можливості будь-якого конкретного технологічного процесу щодо мінімізації потенційних відходів, при перерахованих вище обмеженнях.

Висновки

1. Умовою подолання принципу термодинамічної двоїстості як основи появи відходів в УТП, в напрямку їх мінімізації в самому УТП, є стан термодинамічної

неврівноваженості для всіх компонентів матеріального кластера УТП на межі його хаосу.

2. Для будь-якого технологічного процесу завжди існує робоча термодинамічна точка А на феноменологічній кривій в нижній межі неуврівноваженості, яка визначає здатність конкретного технологічного процесу цілеспрямовано змінювати структуру всього сировинного кластера, без порушення термодинамічної стабільності всієї системи.

3. Показано, що відношення $E_w = 0,62 \cdot E_0$ є не тільки граничною умовою фрактального хаосу в УТП, а й умовою стійкості самого УТП, як об'єкта фрактально-кластерної моделі на межі хаосу. При цьому термодинамічний коефіцієнт r , який відображає відношення сумарної роботи по перетворенню всіх сировинних матеріалів в товарну продукцію до базового значення енергії E_0 в стійкому стані, не повинен перевищувати значення 0,35 для УТП.

Перелік використаних джерел

- [1] Волошин В.С. Про одну особливість принципу термодинамічної двоїстості як причини появи промислових відходів. *Фізика та освітні технології*. 2024. Вип. 2. С. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-2-2>.
- [2] Волошин В.С. Відходи та їх природа. К. : СПД Самченко, 2024. 630 с.
- [3] Волошин В.С. Відходи та термодинаміка. К. : СПД Самченко, 2024. 80 с.
- [4] Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco : W.H. Freeman and Company, 1982. 468 p.
- [5] Meakin P. Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 368 p.
- [6] Stanley H.E. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena. New York : Dover Publications, 1971. 396 p.
- [7] Glandsdorff P., Prigogine I. Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations. New York : Wiley-Interscience, 1971. 394 p.
- [8] Kardano J. Ars Magna. Milano. Archive of Mathematical Works. 1545. 238 p.

APPLICATION OF FRACTAL-CLUSTER THEORY OF MATERIAL RESOURCES

MANAGEMENT TO ASSESS THE CONDITIONS FOR MINIMIZING INDUSTRIAL WASTE AT THE SOURCE OF THEIR OCCURRENCE – A GENERALIZED TECHNOLOGICAL PROCESS

Voloshyn V.S.

D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsvlshn52@gmail.com;

Burko V.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

The paper attempts to establish the real limits of the capabilities of the generalized technological process to assimilate the conditions for overcoming the condition of thermodynamic duality, as the cause of the appearance of waste in the technological process itself. The proposed method for assessing the thermodynamic state of the generalized technological process from thermodynamic indicators makes it possible to assess the parametric limits for overcoming the state of thermodynamic duality and ensuring the stable thermodynamic non-equilibrium and irreversibility in the mechanisms of waste minimization within the technological process. A parametric relationship has been established between the main thermodynamic indicators that characterize the ability of Generalized Technological Process to absorb additional energy for processing potential waste into marketable products, without violating the stability of the entire Generalized Technological Process. It is shown that the condition for overcoming the principle of thermodynamic duality, as the basis for the appearance of waste in the Generalized Technological Process, in the direction of their minimization in the Generalized Technological Process itself, is the state of thermodynamic nonequilibrium for all components of the material cluster of the Generalized Technological Process at the boundary of its chaos. It is established that for any technological process there is always an operating thermodynamic point A on the phenomenological curve at the lower boundary of nonequilibrium, which determines the ability of a particular technological process to a purposeful change in the structure of the entire raw material cluster, without violating the thermodynamic stability of the entire system. It is shown that the ratio is not only a boundary condition for fractal chaos in Generalized Technological Process, but also a condition for the stability of the Generalized Technological Process itself, as an object of the fractal-cluster model at the boundary of chaos. At the same time, the thermodynamic coefficient $E_w = 0,62E_0r$ that reflects the ratio of the total work on the transformation of all raw materials into marketable products to the basic value of energy in a steady state should E_0 not exceed the value of 0.35 for Generalized Technological Process.

Keywords: industrial waste, waste management, mathematical methods, thermodynamic disequilibrium, fractals, clusters, Generalized Technological Process.

References

- [1] V. Voloshyn, «Pro odnu osoblyvist printsipy termodynamichnoi dvoedinosti yak prichyny poyavleniya promyslovych vidchodiv» [«On One Peculiarity of the Principle of Thermodynamic Duality as a Cause of Industrial Waste»], *Fizyka ta osviti tekhnolohii – Physics and Educational Technology*, vol. 2, pp. 12-18, 2024. doi: 10.32782/pet-2024-2-2.
- [2] V. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [3] V. Voloshyn, *Vidkhody ta termodynamika* [Waste and thermodynamics]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [4] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco, USA: W.H. Freeman and Company Publ., 1982.
- [5] P. Meakin, *Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [6] H.E. Stanley, *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*. New York, USA: Dover Publications, 1971.
- [7] P. Glansdorff, and I. Prigogine, *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*. New York, USA: Wiley-Interscience, 1971.
- [8] J. Kardano, *Ars Magna*. Milano. Archive of Mathematical Works. 1545.

Стаття надійшла 23.01.2025

Стаття прийнята 19.02.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Волошин В.С., Бурко В.А. Застосування фрактально-кластерної теорії управління матеріальними ресурсами для оцінки умов мінімізації промислових відходів у джерелі їх виникнення – узагальненому технологічному процесі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 210-217. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336391>.

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336400

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНОЇ СИСТЕМИ НАФТОНАЛИВНОГО СУДНА

Погорлецький Д.С.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Грицук І.В.	д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820 , e-mail: gritsuk_iv@ukr.net ;
Худяков І.В.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Самарін О.Є.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6304-0777 ;
Носов П.С.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5067-9766

В статті розглядаються питання експлуатації та підвищення ефективності роботи вантажної системи танкера, яка приймає, перекачує і видаляє з судна нафтопродукти. Приділена увага вантажній системі танкеру поширеної гідравлічної вантажної установки FRAMO виробництва фірми Frank Mohn Fusa A/S, Норвегія. Розглянуто будову даної системи, її особливості експлуатації, приділена увага розгляду можливих несправностей гідравлічної вантажної системи Frato, виникаючих під час роботи в різних кліматичних умовах. Дана гідравлічна вантажна система досить поширена на окремих типах суден, але має деякі недоліки, як і усі гідравлічні системи морських суден. Можливим недоліком конструкції цієї системи є те, що вона висить на спеціальних кріпленнях і при неповній заповненості танку може легко зруйнуватися, переміщуючись під час качки з вантажем. З огляду на конструктивну складність гідравлічної системи FRAMO, практично виключається можливість її ремонту силами екіпажу на судні під час рейсу. Ця система температурно залежна від навколишнього середовища та можливий вихід з ладу системи у наслідок перегріву гідравлічної рідини, підвищені температури гідравлічного масла (вище 60°C) прискорюють процес старіння масла, сприяючи процесам окислення і окисної полімеризації з виділенням і випадінням в осад органічних кислот і асфальтосмолистих речовин. В результаті окислювальних процесів виникає корозійний знос гідроагрегатів і передчасний вихід з ладу фільтруючих елементів. Для покращення температурного стану гідравлічної системи пропонується встановлення додаткового теплообмінного апарату та підключення частотного регулятора (програмованого мікроконтролеру) до відцентрового циркуляційного насоса заборотної води, який подає воду на теплообмінний апарат системи охолодження гідравлічної вантажної системи. Обґрунтовано можливість модернізації системи охолодження гідравлічної рідини вантажної системи «FRAMO» та описано особливості режимів роботи модернізованої системи охолодження.

Ключові слова: нафтоналивне судно, вантажна система, гідравлічне масло, теплообмінний апарат, умови експлуатації.

Постановка проблеми

Поряд зі зростанням і вдосконаленням танкерів удосконалювалося також їх обладнання, в тому числі спеціальні системи, що забезпечують проведення вантажно-розвантажувальних операцій, збереження вантажу при транспортуванні.

До складу спеціальних систем танкерів входять системи вантажного комплексу – вантажна і зачисна забезпечуючі системи. Вантажна система призначена для прийому та перекачування в межах судна і вивантаження рідких вантажів. Вантажні насоси мають окремі магістральні трубопроводи, від яких в певну групу танків йдуть приймальні відростки, які замикаються клапанами чи клінкетами. Така проводка

всмоктуючого трубопроводу дозволяє незалежно приймати і відкачувати кілька різних сортів нафтопродуктів [1-5]. Основною системою на танкері є вантажна, її пристрій повинен забезпечувати швидко та безпечно заповнення і осушення танків, достатню остійність судна при навантаженні і розвантаженні, а також протипожежну безпеку.

Перевага вантажних систем з гідроприводом окремих насосів полягає в можливості проводити вантажні операції одночасно у багатьох танках при різноманітних вантажах, виключаючи можливість змішування цих вантажів. Крім того, вони практично пожегобезпечні, так як використовують в якості робочої рідини гідравлічні масла (як в силових, так і в керуючих системах). З огляду на ці особливості, широке поширення

вони отримали на танкерах-хімовозах, які мають багато вантажних танків, що вміщають широкий спектр хімічних вантажів [1-6]. Основна ідея гідравлічної вантажної системи полягає в тому, що все обладнання, що знаходиться поза машинним відділенням (вантажні насоси, палубні лебідки, брашпиль, швартові лебідки, баластні насоси, підрулюючі пристрої), приводяться в дію гідромоторами, які отримують енергію у вигляді потоку масла високого тиску, що подається від силових модулів насосної станції (електрогідравлічних насосів) [1-10].

Основний недолік гідравлічної вантажної системи це перегрів гідравлічного масла. Гідравлічне масло, розігріте вище максимально допустимої температури, втрачає значну частину експлуатаційних характеристик, що призводить не тільки до погіршення продуктивності роботи, але і до виходу з ладу комплектуючих вантажної гідросистеми, гідравлічних пристроїв, ущільнень, гідрошлангів. Перегрів масла часто трапляється через надмірне навантаження на гідросистему. Наприклад, коли насос працює на гранично високих обертах, намагаючись перекачувати рідину. Масло розігрівається і, коли температура перевищує максимальну позначку в 80°C, починають «протікати» ущільнювачі. Перегрів – прямий шлях до неминучої поломки, тому допускати його непотрібно [4-10]. На ефективність роботи гідроприводів з важким і дуже важким режимом роботи найбільший вплив на температурний режим надають втрати енергії, які викликають підвищене тепловиділення і інтенсивно нагрівають робочу рідину. Стан робочої рідини позначається на ефективності експлуатації гідроприводу, оскільки за її рахунок здійснюється функціонування гідрообладнання шляхом передачі енергії, мащення поверхонь тертя, захисту від корозії, відведення тепла і видалення продуктів зносу. Впливають температурні коливання на зміну зазорів деталей, елементів гідроприводу, тертя контактуючих поверхонь і фізико-механічні властивості матеріалу [1-10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомі вантажні та зачисні системи нафтоналивних суден, що здійснюють прийом та видачу вантажу, а також перекачування його між танками або групами танків [1-8]. Основним недоліком цих вантажних систем є неможливість повного відкачування вантажу, так як вантажні насоси великої продуктивності з великим діаметром трубопроводів при зниженні рівня рідини в танках починають захоплювати повітря, що призводить до розриву потоку та зупинки вантажних насосів. Відкачування залишків вантажу з танків, не забраних вантажною системою, проводиться за допомогою зачисної системи, яка по влаштуванню в основному аналогічна вантажній, але має меншу продуктивність і менший діаметр трубопроводів. Це призводить до значних простоїв судна при відкачуванні вантажу, що знижує ефективність наливного судна [5-10].

Основними вимогами, що пред'являються до вантажної системи великотоннажного танкера, призначеного для перевезення сирої нафти, є максимальна простота і забезпечення заданого часу вантажно-розвантажувальних операцій. Вантажна система є основною системою танкера, що визначає ефективність проведення вантажних операцій у комплексі із системою зачистки та газовідвідними пристроями. Від її типу та комплектації вантажними засобами безпосередньо залежать час стоянки судна при вантажних операціях та ступінь використання танкера для одночасного перевезення різних сортів вантажу. Лінійна система застосовується з використанням відцентрових насосів, розташованих в насосному приміщенні в кормовій частині танкера, позаду всіх вантажних танків. Клінкетна система відрізняється від попередніх тим, що в вантажних танках не прокладаються трубопроводи. У перегородках днища вирізаються отвори, що закриваються спеціальними засувками. Під час навантаження і вивантаження вантаж перетікає через ці отвори з танків в танк, де встановлюються вантажні і зачисні трубопроводи, поблизу від насосного приміщення. Цю систему називають ще системою вільного потоку (FREE FLOW). Перевагою системи є невелика кількість встановлюваних трубопроводів, що зменшує витрати на будівництво танкера. Недоліком є обмеження можливостей при перевезенні одночасно декількох сортів вантажу [1-10].

Досить широко поширена гідравлічна вантажна система FRAMO виробництва фірми Frank Mohn Fusa A/S, Норвегія. Комплектація цієї системи залежить від кількості і вантажомісткості танків. Особливу увагу фірма-виробник приділяє питанням боротьби з вібрацією і шумом. Для цього поряд з жорсткими широко застосовуються гнучкі трубопроводи, а також різного роду амортизатори, що встановлюються при проході магістралі через горизонтальні і вертикальні перебирання [6-8]. Гідравлічний мотор, за рахунок подачі масла під високим тиском, приводить в дію відцентровий насос. Великим недоліком цієї конструкції є те, що вона висить на спеціальних кріпленнях і при неповній заповненості танку може легко зруйнуватися вантажем, що переміщається під час качки [1-10]. З огляду на конструктивну складність гідравлічної системи FRAMO, практично виключається можливість її ремонту силами екіпажу. Можливо виконання окремих робіт по заміні деталей і відновленню герметичності трубопроводів, періодично виконуються роботи, пов'язані з очищенням та ремонтом масляного холодильника. Основними параметрами гідроприводу є: номінальна подача Q_n , номінальний тиск p_n , і загальний ККД η . Тиск в гідросистемі і швидкість руху гідропривідних насосів є вихідними для визначення внутрішніх діаметрів трубопроводів, втрат тиску в гідросистемі, величини подачі робочої рідини. При підвищенні температури робочої рідини вище допустимого рівня, різко збільшуються об'ємні втрати, що знижує об'ємний ККД гідромашин, знижується змащувальна здатність, збільшується контакт деталей, можливо, їх

схоплювання, що призводить до передчасного зносу і втрати працездатності елементів гідроприводу [6-8].

У дослідженнях [1-10] при вивченні залежності сили тертя і сили тертя ковзання ущільнень гідроприводів, золотників розподільників від температури було показано збільшення сил тертя при підвищенні температури вище + 60°C. Також відзначено, що штучним підтриманням температури (в'язкості) робочої рідини в оптимальному діапазоні за допомогою теплообмінних апаратів, в якому втрати енергії на тертя мінімальні, можна істотно знизити втрати на тертя в гідроустаткуваннях [1-7]. Підвищення температури робочої рідини до +70°C призводить до зниження продуктивності гідроприводу до 35%. При перегріві робочої рідини до 90°C можемо бачити зниження робочих швидкостей гідроприводів, падіння тиску нагнітання з 250·105 до 200·105 Н/м², зменшення технічної продуктивності більш ніж удвічі. Збільшення робочого циклу і зниження швидкостей виконавчих органів обумовлені збільшенням об'ємних витоків в гідроприводі, викликаних підвищенням температури робочої рідини [1-8]. Також відомо, що з підвищенням температури зменшується в'язкість робочої рідини, що неодмінно викликає збільшення об'ємних втрат внаслідок збільшення протікань. Крім того, при нагріванні робочої рідини до високої температури порушуються оптимальні умови змазування робочих поверхонь, що може спровокувати локальне інтенсивне зношування. Тому можна сказати, що теплообмінні апарати для додаткового охолодження гідроприводу збільшують ресурс роботи гідравлічної системи [1-10].

Мета статті

Метою дослідження є огляд особливостей експлуатації і роботи гідравлічної вантажної системи нафтоналивного судна та обґрунтування способів модернізації вантажної системи «FRAMO». Продемонструвати операції щодо підвищення ефективності експлуатації вантажної системи танкера «MAERSK BERING» за рахунок комплексної модернізації системи охолодження гідравлічного масла і вибору оптимального режиму роботи системи охолодження, для забезпечення оптимального температурного режиму роботи гідравлічної вантажної системи. Розглянути можливість використання частотної регулювання (програмованого мікроконтролером) відцентрових насосів, які використовуються в системі охолодження гідравлічної рідини, вантажної системи, для оптимізації її роботи.

Виклад основного матеріалу

У зв'язку з експлуатацією судна «MAERSK BERING» (IMO 9299422) в умовах тропічного клімату (Африка, В'єтнам, Єгипет), температура навколишнього середовища коливається в межах 40...56°C, а температура забортної води коливається від 32°C до 39°C в портових зонах і в припортових районах. Найбільші температури забортної води спостерігаються не

на екваторі, а північніше, смуга цих температур незначно змінює своє положення в різні сезони (термічний екватор).

Середні значення температури забортної води на поверхні світових океанів в районі термічного екватора перевищують 28...32°C. За даними спостережень, середня температура у всіх океанах дорівнює +17,4°C (в Тихому – +19,1°C, в Індійському – +17,0°C, в Атлантичному – +16,9°C). Найвища температура забортної води Перській затоці +36,7°C.

В умовах вологого тропічного клімату коливання температури за добу можуть перевищити 15...20°C. Суднове гідравлічне обладнання та саме судно, яке розміщене на верхніх палубах, під відкритим небом може розігрітись до температури +98°C. На рис. 1 представлена карта максимальних температур забортної води одного з регіонів.

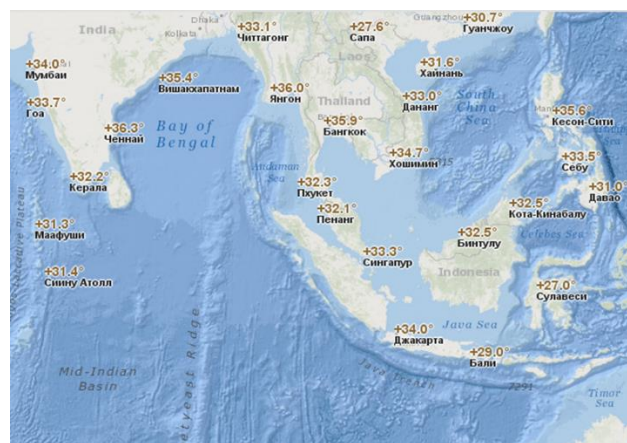


Рис. 1 – Карта температур забортної води

Кількість витрати забортної води через теплообмінний апарат залежить від навантаження на гідравлічні лінії та гідроприводи вантажної системи танкера, це визначає кількість теплоти, яку необхідно відвести від гідравлічної системи в цілому, а з іншого боку від температури забортної води, яка залежить від пори року та району плавання судна. Щоб можливо було гарантувати надійну експлуатацію вантажної гідравлічної системи танкера в будь-якій точці земної кулі, необхідно розраховувати теплообмінний апарат системи охолодження гідравлічної системи для роботи в тропічних і в арктичних умовах та враховувати тривалість вантажних операцій і фізико-хімічні властивості перекачуваного вантажу. Системи охолодження гідравлічної рідини вантажної системи «FRAMO» забезпечують надійну роботу до температури забортної води 32°C. При досягненні критичної температури забортної води більше 32°C, а в деяких районах з тропічним кліматом температура забортної води сягає від 34°C до 39°C у портах та на мілководді, температура гідравлічної рідини заходить за межі 70...75°C. При досягненні температури гідравлічної рідини 87...90°C вантажна система автоматично вимкнеться (спрацює аварійна

система захисту), залишиться в роботі тільки циркуляційна система гідравлічного масла, яка буде перекачувати гідравлічне масло через водомасляний теплообмінний апарат, охолоджуваний забортною водою для охолодження гідравлічної рідини до заданих робочих температур [5-8].

Періодичне підвищення температури робочої рідини до максимально допустимого значення (в умовах високих температур навколишнього середовища) скорочує період безперервної роботи гідроприводів [1-10]. Теплове розширення, внаслідок впливу температури навколишнього середовища, призводить до порушення кінематичних зв'язків через зміни лінійних розмірів елементів і відхилень в системі допусків. Це підвищує ймовірність заклинювання деталей прецизійного виконання [1-10].

Експлуатація гідроприводів в зонах, де температура навколишнього середовища вище $+30^{\circ}\text{C}$, потребує проведення ряду заходів. На даному часовому етапі виявлено кілька основних напрямків рішень цієї проблеми:

- використання робочих рідин з в'язкістю, що відповідає кліматичним умовам;
- використання сучасних матеріалів і особливо композитних в місцях тертя деталей гідроприводів;
- суворе дотримання технічного обслуговування відповідно до керівництва по експлуатації;
- використання теплообмінників в гідравлічній системі.

При використанні гідравлічного обладнання слід мати на увазі, що температура робочої рідини поступово збільшується внаслідок виникаючого в процесі роботи тертя між робочою рідиною і компонентами гідравлічного приводу [1-10].

Для покращення температурного режиму роботи гідравлічної системи запропоновано встановлення додаткового теплообмінного апарату, електричного термостату (для регулювання потоків охолоджувальної рідини), контролеру та частотного перетворювача на циркуляційний насос забортної води, всі ці пропозиції відмічені на рис. 2.

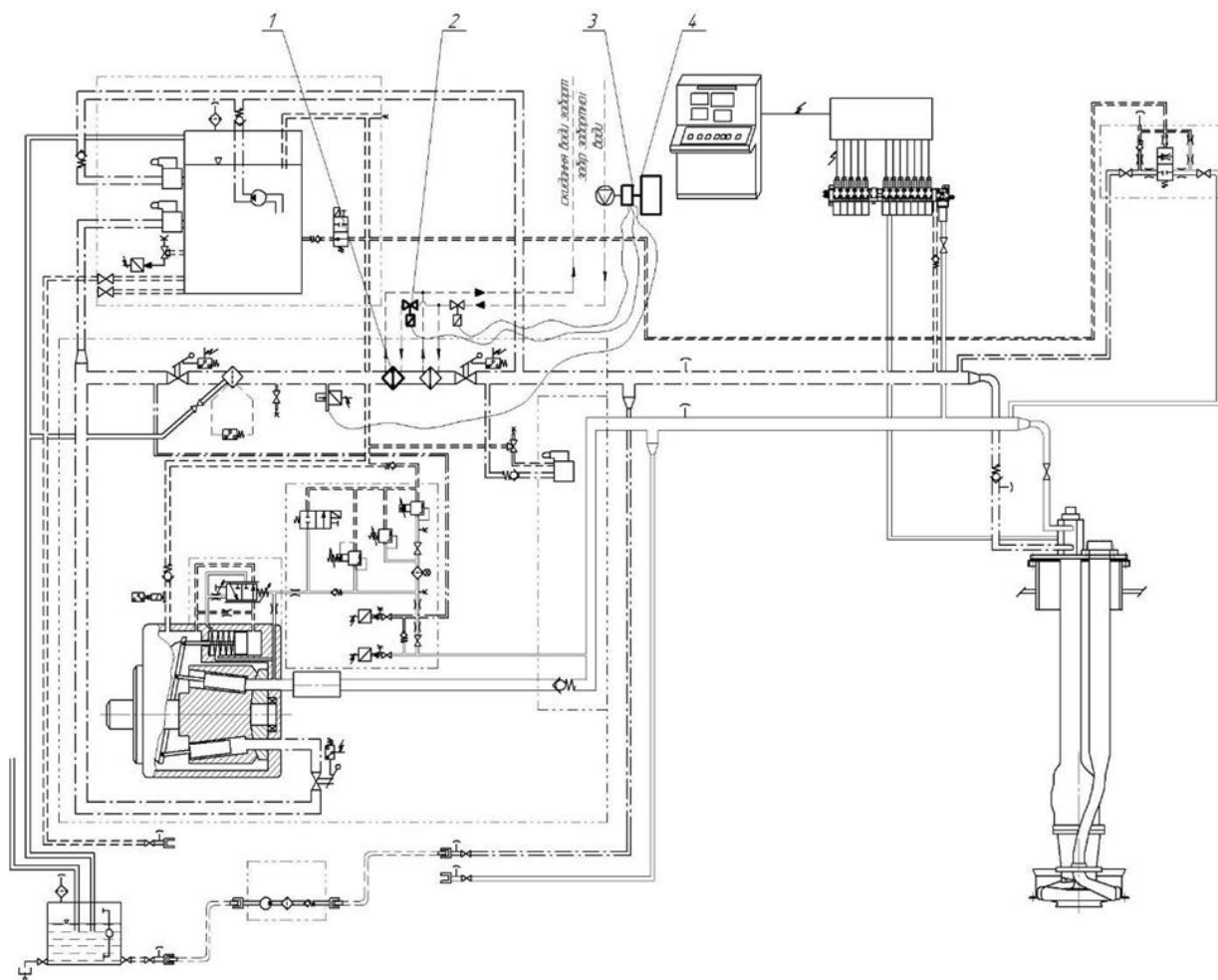


Рис. 2 – Схематичне зображення місць встановлення додаткового обладнання до системи охолодження гідравлічної рідини вантажної системи «Гіапо» танкеру: 1 – додатковий теплообмінний апарат; 2 – електронний термостат; 3 – контролер; 4 – частотний перетворювач

Встановлення додаткового обладнання дозволить розширити режими охолодження та підтримання оптимальної робочої температури гідравлічної рідини у вантажній системі, зменшити теплове навантаження на теплообмінний апарат системи охолодження гідравлічної рідини (масла) вантажної системи танкера. За рахунок використання мікроконтролера можливо задавати та програмувати алгоритми роботи системи охолодження та більш точно відрегулювати температурні діапазони роботи системи на різних режимах:

- прогрів системи;
- нормальний режим роботи гідравлічної системи без потреби в охолодженні;
- нормальний режим роботи з робочою системою охолодження штатним теплообмінним апаратом та частотним регулюванням циркуляції охолоджуючої рідини;
- нормальний режим роботи разом з системою охолодження штатним та додатковим теплообмінним апаратами і з частотним регулюванням циркуляції охолоджуючої рідини;
- аварійний режим роботи системи охолодження гідравлічної рідини.

Встановлений частотний перетворювач (ЧП) дозволить більш точно та в широкому діапазоні робочих температур підтримувати заданий температурний режим системи охолодження для гідравлічної рідини вантажної системи танкера. Частотний перетворювач має дискретні і аналогові виходи для підключення датчиків тиску, температури, приладів вимірювання витрати, віддалених пристроїв управління і контролю, аварійної сигналізації і так далі. Обробка даних відбувається в блоці управління на базі мікропроцесора. Схема управління ЧП генерує сигнали на зміну продуктивності, включення або відключення насосних агрегатів згідно заданої програми і зміни технологічних параметрів в системі охолодження.

Регулюванням частоти обертання насоса його робочі параметри приводяться у відповідність з режимом роботи системи охолодження. Щоб змінити частоту обертання насоса, необхідний регульований електропривод. Значення частоти обертання насоса, з якою він повинен працювати в той чи інший момент часу, визначається системою автоматичного управління насосною установкою. Необхідне значення частоти обертання встановлюється в залежності від багатьох факторів. До них відносяться: витрата рідини в системі охолодження, значення статичного і динамічного протитиску, кількість паралельно працюючих насосів і насосних установок, які подають рідину в систему охолодження, і так далі.

При падінні тиску, частотний регулятор формує сигнал на включення насосних агрегатів. Запуск відбувається в плавному режимі, що запобігає гідроудару.

При наростанні тиску, сигнал з датчика надходить на ЧП, який плавно змінює швидкість обертання приводного двигуна і знижує продуктивність насосів. Така

схема може включати додаткові насосні агрегати при пікових значеннях водоспоживання системи охолодження.

Комплектування електродвигунів насосних агрегатів частотними перетворювачами забезпечує:

- Плавне включення і зупинку насосів, що знижує ймовірність гідравлічних ударів у системі.
- Спрощення автоматичного регулювання із зворотним зв'язком по напору, тиску, іншим параметрам мережі. Аналогові виходи витратомірів і манометрів можна підключати безпосередньо до частотного перетворювача.
- Захист насосних агрегатів від «сухого ходу» перевантажень.
- Відключення електродвигунів при перегріванні обмоток, обриві однієї або декількох фаз, скачках напруги та інших аваріях.
- Збільшення терміну служби мережі системи охолодження за рахунок точної підтримки необхідного тиску, зниження навантаження на трубопроводи.
- Зниження шуму при експлуатації насосних агрегатів.

Після виконання модернізації системи охолодження гідравлічної вантажної системи «Frato» на судні, необхідно визначитись, за яким алгоритмом буде працювати система охолодження гідравлічної рідини.

Для цього необхідно прописати (запрограмувати) в контролер діапазони температур, за яких:

- циркуляційний насос системи охолодження почне працювати;
- термостат на теплообмінний апарат почне відкриватися або закриватися в штатному виконанні системи;
- встановити частоту обертання циркуляційного насоса системи охолодження в залежності від температури гідравлічної рідини (масла);
- запрограмувати термостат на додатковому теплообмінному апараті для його відкриття та закриття.

За рахунок цього можливо зменшити теплове навантаження на теплообмінний апарат та з'явиться можливість налаштування роботи циркуляційного насоса системи охолодження на економічний режим, це становить 75...80% від номінального режиму роботи. Дана система дозволяє регулювати температуру гідравлічної рідини (масла) за рахунок частотного регулювання циркуляційного насоса, а також за рахунок дроселювання за допомогою електротермостатів. Значення параметрів роботи можна прив'язати як до відсоткового навантаження на циркуляційний насос при досягненні сталого температурного режиму, так і до відсоткового навантаження на теплообмінні апарати, це дозволить застосовувати систему охолодження в аварійному режимі при виході з ладу частотного перетворювача. Приклад алгоритму функціонування системи охолодження гідравлічної рідини (масла) вантажної системи «Frato» на танкері наведено на рис. 3.

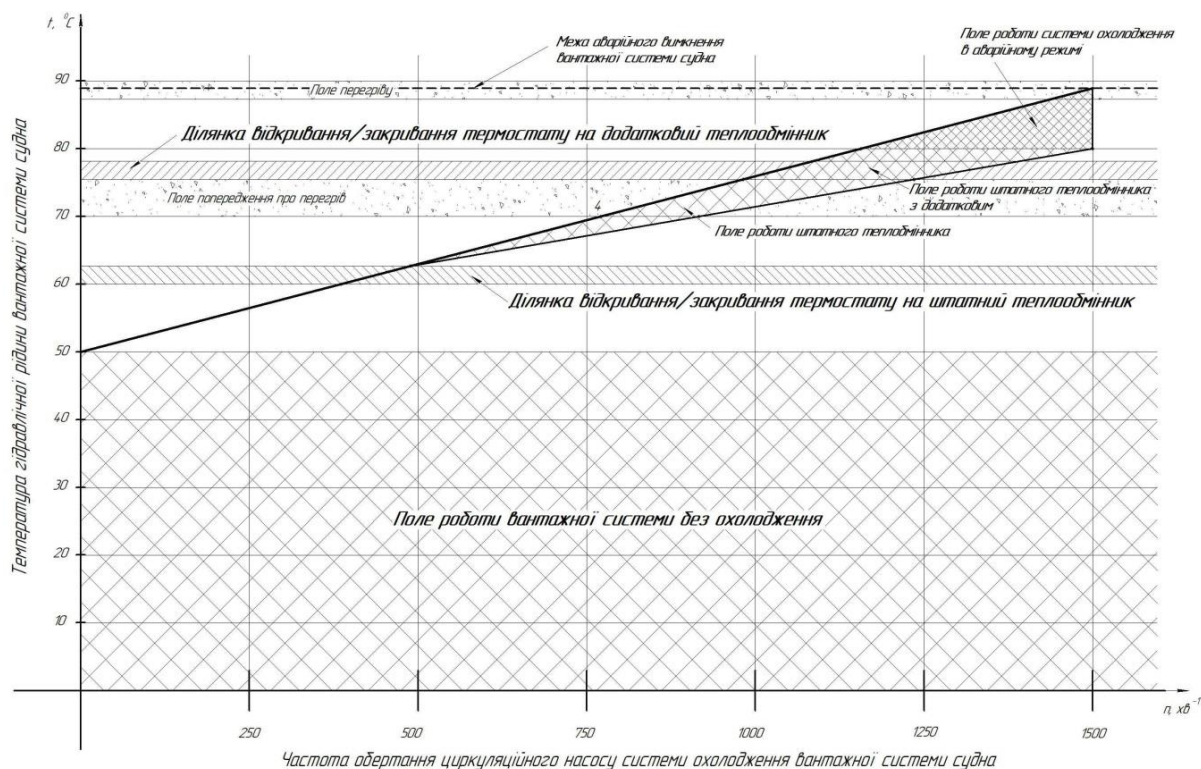


Рис. 3 – Алгоритм функціонування системи охолодження гідравлічної рідини вантажної системи «Framo»

При використанні вантажної системи в умовах тропічного клімату, температура забортної води може перевищувати допустимі межі та вантажна система автоматично вимикається при досягненні температури гідравлічної рідини 90°C.

модернізації можливе подовження (збільшення міжсервісних інтервалів технічного обслуговування) роботи елементів системи як вантажної, так і системи охолодження гідравлічного масла, та підвищення безпеки використання вантажної системи.

Висновки

Основною метою даної роботи є аналіз експлуатаційних режимів роботи вантажної системи танкеру «MAERSK BERING». Була приділена увага демонстрації операцій щодо підвищення ефективності експлуатації гідравлічної вантажної системи за рахунок модернізації системи охолодження гідравлічної рідини (масла) вантажної системи «FRAMO», встановленої на танкері для перевезення нафти та продуктів хімічної промисловості. Запропоновано встановлення додаткового теплообмінного апарату, терморегуляційного термостату та підключення частотного регулятора (програмованого мікроконтролеру) до відцентрового циркуляційного насоса забортної води, який подає воду на теплообмінний апарат системи охолодження гідравлічної вантажної системи. Вважаємо доцільною дану модернізацію, так як вона є комплексною модернізацією системи охолодження гідравлічної рідини вантажної системи танкеру, яка забезпечує надійну роботу системи при граничних температурах забортної води більше ніж 32°C і дозволяє працювати гідравлічній вантажній системі не заходячи до аварійних режимів роботи. Також за рахунок використання даної

Перелік використаних джерел

- [1] Габрієлова Т.Ю., Литвиненко С.Л., Баннов О.В. Організація та технологія доставки спеціальних категорій вантажів: підручник. К.: Видавничий дім «Кондор», 2018. 416 с.
- [2] Гідравлічні вантажні системи танкерів. URL: <https://scribd.com/document/713372505> (дата звернення: 02.03.2025).
- [3] Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). Guidelines for Offshore Tanker Operations. 1st ed. 2018. 250 p.
- [4] Правила класифікації та побудови морських суден : у 3 т. К. : Регістр судноплавства України, 2022. Т. 3. 630 с.
- [5] Armitage P. Crude Oil Tanker Basics – The Theory and Practice of Crude Oil Cargo Operations. Witherby Seamanship International Ltd, 2009. 192 p.
- [6] Framo Marine Solutions. URL: <https://www.framo.com/marine/> (дата звернення: 10.12.2024).
- [7] Framo Hydraulic Cargo Pumping System On Ships. URL: <https://scribd.com/document/353409348/Framo->

[Hydraulic-Cargo-Pumping-System-on-Ships](#) (дата звернення: 13.01.2025).

- [8] Kamel M., Al Shehhi K. VOC Recovery System for Crude Oil Tanker Loading. Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, October 31–November 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2118/210906-MS>.
- [9] Омельчук А.А., Колібанов О.К., Поливода В.В. Дослідження можливості застосування

електроприводу для модернізації вантажної системи танкера. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. № 1(68). С. 19–24.

[10] Egorov G.V., Egorov A.G. Basic designing principles of river-sea cargo vessels construction. *Суднобудування та морська інфраструктура*. 2014. Вип. 2(2). С. 48–62.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF THE CARGO SYSTEM OF AN OIL TANKER VESSEL

Pohorletskyi D.S.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Gritsuk I.V.	D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820 , e-mail: gritsuk_iv@ukr.net ;
Khudiakov I.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Samarin O.E.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6304-0777 ;
Nosov P.S.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5067-9766

The article discusses the issues of operation and increasing the efficiency of the tanker cargo system, which receives, pumps and removes petroleum products from the vessel. Attention is paid to the tanker cargo system, the widespread hydraulic cargo installation FRAMO manufactured by Frank Mohn Fusa A/S, Norway. The structure of this system, its features of operation are considered, attention is paid to considering possible malfunctions of the Framo hydraulic cargo system arising during operation in different climatic conditions. This hydraulic cargo system is quite widespread on certain types of vessels, but has some disadvantages, like all hydraulic systems of sea vessels. A possible disadvantage of the design of this system is that it hangs on special mounts and, if the tank is not completely filled, it can easily collapse when moving while pitching with cargo. Given the structural complexity of the FRAMO hydraulic system, the possibility of its repair by the crew on the vessel during the voyage is practically excluded. This system is temperature-dependent on the environment and the system may fail due to overheating of the hydraulic fluid, elevated temperatures of the hydraulic oil (above 60 °C) accelerate the aging process of the oil, contributing to the processes of oxidation and oxidative polymerization with the release and precipitation of organic acids and asphalt resinous substances. As a result of oxidative processes, corrosive wear of hydraulic units and premature failure of filter elements occurs. To improve the temperature state of the hydraulic system, it is proposed to install an additional heat exchanger and connect a frequency regulator (programmable microcontroller) to the centrifugal circulation pump of the sea water, which supplies water to the heat exchanger of the cooling system of the hydraulic cargo system. The possibility of upgrading the hydraulic fluid cooling system of the cargo system «FRAMO» is substantiated and the features of the operating modes of the upgraded cooling system are described.

Keywords: oil tanker, cargo system, hydraulic oil, heat exchanger, operating conditions.

References

- [1] Т.Іу. Habrielova, S.L. Lytvynenko, and O.V. Bannov, *Orhanizatsiia ta tekhnolohiia dostavky spetsialnykh katehorii vantziv: pidruchnyk* [Organization and technology of delivery of special categories of cargo: textbook]. Kyiv, Ukraine: Condor Publishing House, 2018. (Ukr.)
- [2] Гідравлічні вантажні системи танкерів. [Online]. Available: <https://scribd.com/document/713372505>. Accessed on: March 2, 2025.
- [3] Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), *Guidelines for Offshore Tanker Operations*, 1st ed., 2018.
- [4] *Pravyla klasyfikatsii ta pobudovy morskikh suden* [Rules for the classification and use of maritime vessels], Shipping Register of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2022, vol. 3. (Ukr.)

- [5] P. Armitage, *Crude Oil Tanker Basics – The Theory and Practice of Crude Oil Cargo Operations*. Witherby Seamanship International Ltd, 2009.
- [6] Framo Marine Solutions. [Online]. Available: <https://www.framo.com/marine/>. Accessed on: December 10, 2024.
- [7] Framo Hydraulic Cargo Pumping System On Ships. [Online]. Available: <https://scribd.com/document/353409348/Framo-Hydraulic-Cargo-Pumping-System-on-Ships>. Accessed on: January 13, 2025.
- [8] M. Kamel, and K. Al Shehhi, «VOC Recovery System for Crude Oil Tanker Loading», in Proc. of the Abu Dhabi Int. Petroleum Exhibition and Conf. ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2118/210906-MS>.
- [9] A.K. Kolebanov, V.V. Polyvoda, A.A. Omelchuk, «Doslidzhennia mozhlyvosti zastosuvannia elektropriyvodu dlia modernizatsii vantazhnoi systemy tankera» [«Research of the possibility of application of electric drive for modernization of the tanker cargo system»], *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Kherson National Technical University*, № 1(68), pp. 19-24, 2019. (Ukr.)
- [10] G.V. Egorov, and A.G. Egorov, «Basic designing principles of river-sea cargo vessels construction», *Sudno-buduvannia ta morskia infrastruktura – Shipbuilding & Marine Infrastructure*, vol. 2(2), pp. 48-62, 2014.

Стаття надійшла 23.04.2025

Стаття прийнята 15.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Підвищення ефективності експлуатації вантажної системи нафтоналивного судна / Д.С. Погорлецький та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 218–225. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336400>.

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДСТЕЖЕННЯ ТА СУПРОВОДЖЕННЯ СУДЕН
НА ВНУТРІШНІХ ВОДНИХ ШЛЯХАХ

Долинська Н.Б. аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1347-0538>, e-mail: tala.borisovna2011@gmail.com;

Калініченко Є.В. канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

У статті досліджено можливості застосування сучасних цифрових технологій для вирішення проблем забезпечення належного рівня безпеки судноплавства. Зокрема, розглянуто використання систем автоматичної ідентифікації суден, річкових інформаційних служб, геоінформаційних систем, технологій обробки великих даних, а також інструментів Індустрії 4.0. Акцентовано увагу на необхідності інтеграції цифрових технологій для створення єдиного інформаційного середовища, що дозволяє забезпечити повноцінний обмін навігаційною, гідрографічною та метеорологічною інформацією між усіма учасниками транспортного процесу. У межах дослідження проведено класифікацію інформаційних потреб користувачів систем моніторингу суден залежно від типів інформації (динамічна, напівдинамічна та статична), а також визначено функціональні вимоги до цифрових систем супроводження та відстеження суден. Встановлено, що для підвищення ефективності таких систем необхідно забезпечити високу швидкість оновлення інформації в реальному часі, сумісність форматів обміну даними, інтеграцію з існуючими системами управління судноплавством і можливість використання прогностичних моделей для прийняття оптимальних управлінських рішень. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження комплексних цифрових платформ, які поєднують можливості сучасних інформаційних технологій для покращення якості управління судноплавством на внутрішніх водних шляхах. У статті сформульовано рекомендації щодо подальшого розвитку інтелектуальних систем моніторингу та супроводження суден, які передбачають інтеграцію цифрових рішень на основі технологій штучного інтелекту та обробки великих даних, розробку єдиної цифрової архітектури для управління рухом суден, а також впровадження сучасних методів прогнозування та аналізу навігаційних ризиків. Отримані результати мають практичне значення для проєктування та впровадження сучасних інформаційних систем у сфері внутрішнього водного транспорту, сприяючи підвищенню конкурентоспроможності та сталому розвитку транспортної галузі України та Європейського Союзу.

Ключові слова: цифрові технології, внутрішні водні шляхи, навігаційна безпека, відстеження суден, супроводження суден, інформаційні системи, безпека судноплавства, транспортна логістика.

Постановка проблеми

Забезпечення ефективного управління судноплавством на внутрішніх водних шляхах є одним із ключових факторів розвитку транспортної інфраструктури та підтримання високого рівня безпеки судноплавства. Зростання інтенсивності вантажних і пасажирських перевезень, поява змішаних зон руху, обмеженість судноплавного простору та збільшення кількості надзвичайних ситуацій створюють додаткові виклики для навігаційної безпеки та координації руху суден.

Традиційні методи відстеження та супроводження суден, які базуються переважно на візуальному спостереженні, використанні радіолокаційних засобів і ручному обміні інформацією, не забезпечують необхідного рівня оперативності, точності та повноти даних для прийняття обґрунтованих рішень в умовах динамічного транспортного середовища.

Водночас, сучасні інформаційні технології відкривають нові можливості для цифровізації процесів моніторингу та управління рухом суден. Використання цифрових технологій, таких як системи автоматичної ідентифікації суден (AIC), річкові інформаційні служби (PIC), інтегровані платформи обміну даними,

Інтернет речей і геоінформаційні системи (ГІС), дозволяє не лише забезпечувати постійний контроль за місцезнаходженням суден, але й створювати інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень для оптимізації транспортних потоків та підвищення безпеки судноплавства.

Однак, незважаючи на наявність окремих елементів цифрової інфраструктури, питання комплексної інтеграції цифрових технологій для відстеження та супроводження суден на внутрішніх водних шляхах залишається недостатньо дослідженим. Відсутність єдиних вимог до функціонування таких систем, несумісність форматів обміну даними, недостатня швидкість оновлення інформації та обмежена доступність навігаційних і гідрографічних даних стримують впровадження сучасних цифрових рішень у цій сфері.

Ці обставини зумовлюють необхідність вирішення актуальної комплексної задачі аналізу існуючих цифрових технологій, визначення вимог до їх функціональності та розробки рекомендацій щодо створення ефективних систем цифрового відстеження та супроводження суден на внутрішніх водних шляхах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нещодавні дослідження підкреслюють важливість цифрових технологій для підвищення безпеки, ефективності та управління внутрішнім водним транспортом. АІС є ключовою технологією для відстеження суден, моніторингу руху та обміну інформацією [1]. РІС надають важливі дані про фарватери, правила та вантажі, покращуючи навігацію та готовність до стихійних лих [2]. Імітаційні моделі, засновані на теорії руху суден, можуть оцінити безпеку водних шляхів і ефективність транспорту [3]. Технології Індустрії 4.0, зокрема методи машинного навчання, застосовуються для вирішення проблем моніторингу дорожнього руху, розумної навігації, скорочення викидів, аналізу великих даних і кібербезпеки [4]. Ці досягнення сприяють загальному вдосконаленню систем внутрішнього водного транспорту, підвищуючи їх привабливість і конкурентоспроможність у глобальному транспортному середовищі.

Річкові інформаційні служби надають узгоджені інформаційні послуги з управління рухом суден для підвищення безпеки та зручності користування внутрішніми водними шляхами в Європі [5]. Система великих даних, інтегрована в загальне середовище обміну інформацією, може покращити морський нагляд і безпеку завдяки інтероперабельному обміну даними [6]. У статті [7] обговорюються цифрові рішення для морського транспорту та логістики, включаючи платформи для обміну даними, єдине морське вікно, системи портового співтовариства та «розумні» контейнери на основі блокчейну. У статті [8] обговорюється впровадження річкових електронних навігаційних систем та берегових інформаційних служб для підвищення безпеки та ефективності на внутрішніх водних шляхах України. Інтегровані системи управління рухом суден можуть оптимізувати транспортний потік на внутрішніх водних шляхах і використання інфраструктури [9]. У роботі [10] розглядаються технологічні розробки та виклики для вантажних перевезень внутрішніми водними шляхами в управлінні інтермодальними ланцюгами поставок, але не розглядаються конкретно цифрові технології та інформаційні рішення для відстеження та розшуку суден. Розглянуті комплексні підходи мають потенціал для більш ефективного управління навігаційною безпекою.

Проаналізовані статті разом підкреслюють важливість комплексного використання цифрових технологій для підвищення ефективності управління судноплаством на внутрішніх водних шляхах. Вони демонструють потенціал інтеграції автоматизованих систем ідентифікації, річкових інформаційних служб, технологій великих даних, методів штучного інтелекту та систем підтримки прийняття рішень для створення єдиних інформаційних просторів. Проте в більшості робіт основна увага приділяється окремим технологічним рішенням або прикладним аспектам, тоді як питання визначення узгоджених функціональних вимог до таких систем, їхньої інформаційної сумісності, оперативності обміну

даними та адаптації до умов внутрішніх водних шляхів залишаються недостатньо розробленими. Це обґрунтовує актуальність дослідження, спрямованого на формування єдиної концепції застосування цифрових технологій для відстеження та супроводження суден, що стане основою для підвищення навігаційної безпеки та ефективності транспортних операцій.

Мета статті

Метою статті є аналіз можливостей і визначення функціональних вимог до впровадження цифрових технологій відстеження та супроводження суден на внутрішніх водних шляхах з урахуванням сучасних інформаційних систем і потреб різних категорій користувачів.

Виклад основного матеріалу

У морській навігації Міжнародна морська організація (ІМО) запровадила систему автоматичної ідентифікації АІС. Усі морські судна в міжнародному рейсі, які підпадають під дію глави V SOLAS, повинні бути оснащені АІС з кінця 2004 року. Керівні принципи планування, впровадження та оперативне використання РІС визначають АІС для внутрішніх вод як важливу технологію. Через зони змішаного руху стандарти, технічні характеристики і процедури внутрішнього судноплавства повинні бути сумісні з уже визначеними стандартами, технічними специфікаціями та процедурами морської навігації.

Щоб задовольнити особливі вимоги внутрішнього судноплавства, АІС пішла далі – було розроблено відповідно до так званої технічної специфікації АІС для внутрішнього транспорту, зберігаючи повну сумісність з морською АІС ІМО та вже існуючими стандартами внутрішнього судноплавства.

У цьому розділі статті визначено всі необхідні функції і вимоги щодо відстеження та супроводження суден у внутрішньому судноплаванні. Описано інформаційні потреби для кожної сфери інтересів. Функціональні вимоги і вимоги на основі Європейського кодексу внутрішніх водних шляхів (СЕВНІ) та інших правил і правил судноплавства на внутрішніх водних шляхах та найкращі галузеві практики, які виділяють три групи інформації:

- Динамічна інформація – така, що змінюється кожні кілька секунд або хвилин;
- Напівдинамічна інформація – така, що змінюється кілька разів за рейс;
- Статична інформація – така, що змінюється рідше кількох разів на рік.

Для кожної групи інформації можуть бути різні способи обміну інформацією:

- Системи відстеження та відстеження суден повинні обмінюватися особливо динамічно;
- Електронні пристрої звітності, такі як електронна пошта, призначені для обміну напівдинамічною інформацією;

• Бази даних призначені для надання статичної інформації, яку можна отримати через інтернет або інші середовища транспорту даних.

У Таблиці 1 наведено огляд областей інтересів, що розглядаються. Кожна область інтересів поділена на завдання, і для кожного завдання визначено категорії користувачів.

Таблиця 1

Огляд сфер інтересів, завдань і користувачів.

Сфера інтересів	Завдання	Користувачі
Навігація	<i>Середньострокове:</i> Тривалістю наперед від хвилин до годин зовні бортового радару судна в залежності від обраної шкали відстані.	Капітан/вартовий помічник
	<i>Короткострокове:</i> Тривалістю наперед хвилини зовні бортового радару судна в залежності від обраної шкали відстані.	Капітан/вартовий помічник
	<i>Дуже короткий термін:</i> Тривалістю наперед від секунд до 1 хвилини	Капітан/вартовий помічник
Управління трафіком суден	Служба регулювання руху суден (CPPC/VTs)	CPPC оператори, Капітан/вартовий помічник
	Операції шлюзування	Оператор шлюзу, Капітан/вартовий помічник
	Планування діяльності та розкладу роботи шлюзів	Оператор шлюзу, Капітан/вартовий помічник, оператори флоту
	Операції з розведення мостів	Оператор мосту, Капітан/вартовий помічник
Служба сприяння зниженню наслідків лиха	Планування операцій з розведення мостів	Оператор шлюзу, Капітан/вартовий помічник, оператори флоту
		Оператор служби сприяння наслідкам лиха, оператор шлюзу, оператор (диспетчер мостового переходу), капітан/вартовий помічник, компетентний орган
	Управління транспортом	Капітан судна, фрахтовий брокер, менеджер флоту, оператор терміналу, оператор CPPC, оператор шлюзу диспетчер мостового переходу, оператор PIC.
	Транспортна логістика	Керівник флоту, капітан, вантажовідправник, вантажоодержувач, експедитор постачання
Виконавчі органи	Адміністрації портів та вантажних терміналів	Оператор терміналу, капітан, експедитор, портове управління, компетентний орган
	Управління вантажами та управління флотом	Керівник флоту, вантажовідправник, вантажоодержувач, експедитор постачання, фрахтовий брокер, капітан
	Перетин кордону	Митниця, компетентний орган, капітан
	Інфраструктурні збори, та збори користування водними шляхами.	Компетентний орган, капітан судна, керівник флоту, управління водних шляхів
Інформаційні послуги із стану водного шляху.	Гідрографічні та метеорологічні зведення	Капітан/вартовий помічник
	Статус зведень та сигналів	Компетентний орган, капітан, керівник флоту
	Рівень води	Компетентний орган, капітан судна/вартовий помічник, керівник флоту

Порядок потреб у зведеннях та даних у кожному завданні не означає різну важливість цих зведень. Проте, безпекові навігаційні зведення мають певний пріоритет, врахування котрих визначає доцільність решти даних.

Обладнання для супроводження та відстеження суден (Рисунок 1) можна використовувати для підтримки активної навігації на борту.

Як зазначалося, процес навігації можна розділити на три етапи:

- Навігація, середньострокова перспектива;
- Навігація на короткий термін;
- Навігація, дуже короткий термін вперед.

Для кожного етапу вимоги користувача різні. Навігація на середньострокову перспективу – це фаза навігації, в якій капітан спостерігає та аналізує дорожню ситуацію на кілька хвилин до години вперед і розглядає можливість місця зустрічі, пропуску або капітального ремонту інших суден. Потрібне зображення дорожнього руху є типовою функцією «огляду за рогом» в основному за межами діапазону бортового радара.

Обмінювана інформація про дорожній рух включає ключові дані щодо судна, зокрема його ідентифікатор, назву, фактичне заглиблення, швидкість та курс відносно землі, пункт призначення чи планований маршрут, тип судна або конвою, розміри (довжина і ширина), кількість синіх конусів або вогнів, стан завантаження чи розвантаження, а також навігаційний статус

(наприклад, якірна стоянка, швартування, плавання або спеціальні умови).

Швидкість оновлення залежить від завдання та статусу судна. Максимальна швидкість оновлення становить 2 секунди.

Навігація на короткий термін – це етап прийняття рішень у процесі навігації. У цій фазі інформація про дорожній рух має значення для процесу навігації, включаючи заходи уникнення зіткнення, якщо це необхідно. Ця функція стосується спостереження за іншими рухомими об'єктами, розташованими в безпосередній близькості від судна.

Інформація обміну про рух містить важливі дані про судно, такі як його ідентифікатор, назву, фактичне заглиблення, швидкість із точністю до 1 км/год, курс та заголовок відносно землі, показчик спеціального маневру (синій знак), пункт призначення чи планований маршрут, тип судна або конвою, розміри (довжина і ширина), кількість синіх конусів або вогнів, стан завантаження чи розвантаження, а також навігаційний статус (наприклад, якірна стоянка, швартування, плавання або особливі умови).

Фактична інформація про рух щодо місця розташування, ідентифікації, імені, напрямку, швидкості, курсом, напрямком і позначкою спеціального маневру (синій знак), безперервно оновлюється, принаймні, кожні 10 секунд. Для деяких маршрутів адміністрації встановлюють попередньо визначену швидкість оновлення (максимум 2 секунди).

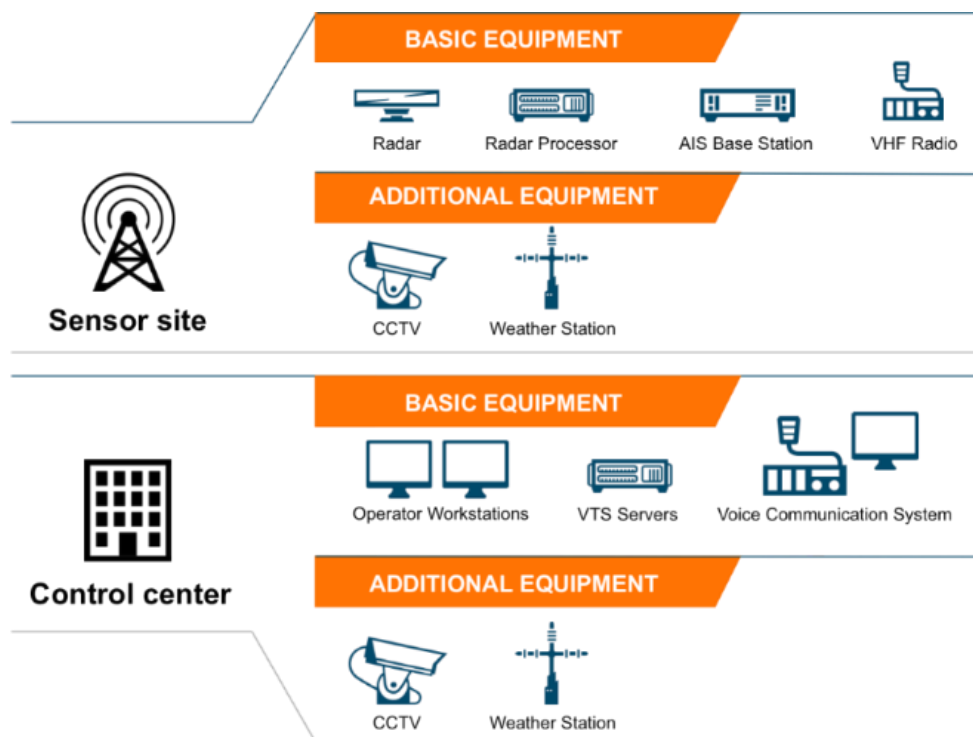


Рис. 1 – Базове та додаткове обладнання в системах моніторингу руху суден

На цьому етапі необхідно отримати високоточні дані, включаючи відповідне положення, назву, відносну швидкість, відносний дрейф та відносну швидкість повороту судна.

Виходячи з вищезазначених вимог, стає зрозуміло, що через дуже стислий час короткочасна навігація не може використовувати інформацію про супроводження та відстеження.

Управління рухом суден включає принаймні один із елементів, визначених нижче:

- Служби руху суден;
- Планування та експлуатація шлюзів;
- Планування та експлуатація мостів.

У службах руху суден (VTS) можна виділити різні служби:

- Інформаційна служба (Рисунок 2);
- Служба навігаційної допомоги;
- Служба організації руху.

В подальшому описуються потреби користувачів, пов'язані з інформацією про рух.



Рис. 2 – Робоче місце оператора системи управління рухом суден

Інформаційне обслуговування здійснюється шляхом трансляції інформації у встановлений час і інтервали або коли VTS вважає це необхідним, або на запит судна. Така інформація може включати, наприклад, повідомлення про заглиблення, умови водного шляху; погода; навігаційні небезпеки; або будь-які інші фактори, які може вплинути на прямування судна.

Для інформаційних послуг необхідний огляд трафіку в мережі або на ділянці фарватеру, який включає ключові дані про судно: ідентифікатор, назву, фактичне заглиблення, курс відносно землі, обмеження судноплавного простору, пункт призначення чи планований маршрут, тип судна або конвою, розміри (довжина і ширина), кількість синіх конусів або вогнів, стан завантаження чи розвантаження, кількість осіб на борту (у разі інциденту) та навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання або спеціальні умови).

Компетентний орган повинен встановити попередньо визначену частоту оновлення даних.

Служба навігаційної допомоги інформує капітана про складні навігаційні або метеорологічні обставини або надає допомогу у разі дефектів або недоліків. Ці послуги, як правило, надаються на запит судна або

VTS, якщо це буде прийнято необхідно. Для надання індивідуальної інформації капітану оператору VTS потрібне фактичне детальне зображення трафіку.

Системи супроводження та відстеження суден надають ключову інформацію, зокрема ідентифікатор та назву судна, його фактичне заглиблення, швидкість, курс відносно землі, позначку спеціального маневру (синій знак), пункт призначення або планований маршрут, тип судна чи конвою, розміри (довжина і ширина), вертикальний габарит у разі перешкод, кількість синіх конусів або вогнів, стан завантаження чи розвантаження, а також навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання або особливі умови).

Будь-яка інша необхідна інформація складається з екологічної та географічної інформації та повідомлення капітанам (NtoS). Фактична інформація про трафік щодо ідентифікації, положення, напрямку, швидкості, курсу і спеціальні маневри (синій знак) необхідно змінювати безперервно (кожні 3 секунди, майже в режимі реального часу або з іншою заздалегідь визначеною швидкістю оновлення, яка встановлена компетентним органом). Вся інша інформація повинна бути доступна на вимогу оператора VTS або в умовах особливих обставин.

Служба організації руху суден (COPC) стосується оперативного управління рухом і перспективне планування руху суден для запобігання заторів і небезпечних ситуацій, і особливо актуальна в період великої інтенсивності руху або рух спеціальних транспортних засобів може впливати на потік іншого транспорту. Послуга також може включати встановлення і експлуатацію системи дозволів на рух або планів плавання за рекомендаціями COPC або обох, стосовно черговості руху, розподілу місць, обов'язковому повідомленні про рух до COPC.

Процеси планування та експлуатації шлюзів поділяються на довгострокові та середньострокові.

Планування на довгострокову перспективу передбачає планування на кілька годин на день вперед.

У цьому випадку інформація про рух використовується для покращення інформації про очікування та час проходження шлюзу і спочатку базується на статистичній інформації.

Для довгострокового планування блокування необхідно отримати інформацію про рух, яка включає ідентифікатор та назву судна, його фактичне місцезнаходження, курс і напрямок, розрахунковий (ETA) та рекомендований (RTA) час прибуття до шлюзу, тип судна або конвою, розміри (довжина і ширина), заглиблення, вертикальний габарит, кількість синіх конусів або вогнів, а також навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання чи спеціальні умови).

ETA має бути доступним на вимогу або має бути замінений у разі відхилення у часі від попередньо зазначеного. RTA – це відповідь на звіт про ETA.

Планування шлюзу на середньострокову перспективу стосується планування шлюзу до двох або чотирьох циклів роботи (зачинити-відкрити) наперед.

У цьому випадку інформація про рух використовується для відображення прибулих суден із наявними шлюзовими циклами та інформуваннями капітанів про РТА (запитуваний час прибуття) на основі планування.

Для середньострокового планування роботи необхідна інформація про прогнозований та реальний трафік.

Для середньострокового планування блокування необхідна детальна інформація про рух судна, включаючи ідентифікацію, назву, фактичне місцезнаходження, швидкість і курс відносно землі, розрахунковий час прибуття (ЕТА) до шлюзу, рекомендований час прибуття (РТА) при зачиненні камери шлюзу, тип судна або конвою, розміри (довжина, ширина), кількість допоміжних буксирів, заглиблення, вертикальний габарит, кількість синіх конусів або вогнів, а також навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання або особливі умови), при цьому ЕТА має бути доступним на вимогу або змінюватися у разі відхилення.

На етапі «Операція шлюзування» відбувається фактичний процес шлюзування.

Щоб полегшити процес шлюзування, необхідно отримувати інформацію про трафік, включаючи ідентифікацію та ім'я судна, його фактичну посаду, швидкість і курс відносно землі, тип судна або конвою, кількість допоміжних буксирів, розміри (довжина і ширина), заглиблення, вертикальний габарит, кількість синіх конусів або вогнів, а також навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання або спеціальні умови). Фактичні дані про рух, включаючи ідентифікацію, положення, напрямок, швидкість і курс, мають надходити постійно або з частотою оновлення, визначеною правилами проходу шлюзу чи місцевою адміністрацією відповідної водної ділянки.

Процеси планування роботи мостів поділяються на середньострокові та короткострокові з урахуванням процесу експлуатації мосту.

Процес планування мосту в середньостроковій перспективі стосується оптимізації.

Рух транспорту здійснюється таким чином, щоб мости відкривалися вчасно для проходу суден (зелена хвиля). Час наперед коливається від п'ятнадцяти хвилин до двох годин. Інтервал залежить від місцевої ситуації.

Для середньострокового планування роботи мосту необхідно отримувати інформацію про прогнозований і реальний трафік, включаючи ідентифікацію та назву судна, його фактичне місцезнаходження, швидкість і курс відносно землі, розрахунковий час прибуття (ЕТА) до мосту та рекомендований час прибуття (РТА) на мосту, тип судна або конвою, розміри (довжина і ширина), вертикальний габарит, а також навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання або особливі умови). ЕТА та позиція мають бути доступними на вимогу диспетчера мосту і оновлюватися у разі відхилення у часі.

У процесі короткострокового планування роботи мосту приймаються рішення щодо його відкриття, для чого необхідна інформація про дорожній рух, зокрема ідентифікація судна, його фактична позиція, швидкість і курс відносно землі, розрахунковий (ЕТА) і рекомендований (РТА) час прибуття до мосту, тип судна чи конвою, розміри (довжина і ширина), вертикальний габарит, а також навігаційний статус (якірна стоянка, швартування, плавання або особливі умови). Фактичні дані про трафік, включаючи положення, швидкість і напрямок судна, мають бути доступні на вимогу або відповідно до частоти оновлення. Приблизний час прибуття та місце розташування повинні бути доступними на вимогу або змінюватися в разі відхилення від попередньо наданого ЕТА.

На етапі експлуатації мосту, коли відбувається його відкриття та проходження судна, необхідно отримувати ключові дані щодо руху, зокрема ідентифікацію та назву судна, його фактичну позицію, швидкість і курс відносно землі, тип судна або конвою, розміри (довжина і ширина) та вертикальний габарит.

Для зменшення наслідків стихійного лиха необхідно отримати інформацію про рух судна, включаючи його ідентифікацію, назву, фактичну позицію, курс і напрямок відносно землі, пункт призначення, тип судна або конвою, кількість синіх конусів або вогнів, стан завантаження чи розвантаження та кількість осіб на борту. У разі аварії ці дані можуть надаватися автоматично або відповідно до обставин надзвичайної ситуації.

Стосовно інформаційних служб фарватеру наводяться три послуги:

- Попередження про погоду в разі екстремальних погодних умов;
- Статус сигналу;
- Рівні води.

Проект «ЕММА» (Система Європейської мульти-сервісної метеорологічної обізнаності) спрямований на стандартизацію попереджень про погоду, використовуючи розроблені символи для відображення повідомлень на системах електронних карт суден внутрішнього плавання (Inland ECDIS). ЕММА не надає постійних даних про погоду, а лише попередження про особливі метеорологічні ситуації, які базуються на розподілі ділянок внутрішніх водних шляхів і включають параметри, такі як швидкість вітру, температура, кількість снігу, опади та видимість у тумані.

Запропонований склад даних включає дату та час початку і завершення терміну дії (з можливістю безстрокового позначення), координати початку та кінця ділянки шляху, тип метеорологічного попередження, мінімальні та максимальні значення параметрів, класифікацію попередження і напрямок вітру. Обмін цією інформацією відбувається лише під час спеціальних заходів у випадку екстремальних погодних умов.

Системи супроводження та відстеження суден можуть використовуватися для передачі статусу

світлофорів у внутрішньому судноплаванні, включаючи положення сигналу, ідентифікацію його типу (один чи два вогні), напрямок впливу та поточний стан. Розповсюдження цієї інформації має бути обмежене визначеними суднами.

Системи супроводження та відстеження суден можуть передавати фактичний рівень води, а зведення включатимуть дані про замірну станцію та значення рівня води, що надсилатиметься регулярно або на вимогу судноводія.

У різних регіонах Європи стягується плата за користування водними шляхами та портовою інфраструктурою, для чого необхідна інформація про рух судна, включаючи його ідентифікацію, назву, фактичну позицію, пункт призначення або планований маршрут, тип судна чи конвою, розміри (довжина, ширина, висота борту для розрахунку кубічного модуля або DWT) та заглиблення. Обмін цією інформацією здійснюється на вимогу або у визначених фіксованих точках, встановлених компетентним органом відповідного водного шляху чи порту.

Проведений аналіз підтверджує, що застосування цифрових технологій відіграє ключову роль у підвищенні ефективності та безпеки управління судноплаванням на внутрішніх водних шляхах. Інтеграція систем автоматичної ідентифікації, річкових інформаційних служб, технологій великих даних та елементів Індустрії 4.0 створює передумови для розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Однак впровадження таких систем потребує вирішення питань сумісності інформаційних платформ, стандартизації форматів обміну даними та забезпечення високої швидкості оновлення інформації в режимі реального часу.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку єдиної цифрової архітектури для відстеження та супроводження суден, що дозволить оптимізувати транспортні потоки, покращити управління навігаційною безпекою та сприяти розвитку сталого внутрішнього водного транспорту.

Висновки

У статті проаналізовано сучасні цифрові технології, що застосовуються для відстеження та супроводження суден на внутрішніх водних шляхах. Визначено, що ключовими інструментами цифровізації в цій сфері є системи автоматичної ідентифікації суден, річкові інформаційні служби, геоінформаційні системи, технології великих даних, а також інструменти Індустрії 4.0, зокрема штучний інтелект і машинне навчання.

Здійснено класифікацію інформаційних потреб користувачів, обґрунтовано функціональні вимоги до систем цифрового моніторингу судноплавання та наведено рекомендації щодо інтеграції цифрових рішень для підвищення ефективності управління рухом суден.

Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку комплексних цифрових платформ для моніторингу, аналізу та управління

судноплаванням на внутрішніх водних шляхах. Це дозволить підвищити навігаційну безпеку, зменшити ризики надзвичайних ситуацій та сприятиме розвитку сталого і конкурентоспроможного внутрішнього водного транспорту.

Перелік використаних джерел

- [1] Bazylev A.V., Plyushchayev V.I. Digital information system for inland water transport vessels based on AIS. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2131(3). Article 032031. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032031>.
- [2] Pfliegl R., Bäck A. Increasing the Attractiveness of Inland Waterway Transport with E-Transport River Information Services. *Transportation Research Record*. 2006. Vol. 1963(1). Pp. 15-22. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198106196300103>.
- [3] Watanabe S., Hasegawa K., Rigo P. Inland Waterway Traffic Simulator. *Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries: Proceedings of the 7th International Conference*, Liege, Belgium, 21-23 April 2008. Pp. 578-588.
- [4] Industry 4.0 Technologies Applied to Inland Waterway Transport: Systematic Literature Review / J.F. Restrepo-Arias et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22(10). Article 3708. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22103708>.
- [5] Broeke I.T., Willems C., Glansdorp C. River Information Services: a joint European effort to enhance safety and usability of the inland waterway. *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems ITSC 2001*, Oakland, California, USA, 25-29 August 2001. Pp. 1108-1115. DOI: <https://doi.org/10.1109/itsc.2001.948817>.
- [6] A maritime big data framework integration in a common information sharing environment / Z. Paladin et al. *Proceedings of the 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, Opatija, Croatia, 23-27 May 2022. Pp. 1161-1166. DOI: <https://doi.org/10.23919/mipro55190.2022.9803777>.
- [7] Maritime Transport And Logistics Digital Solutions Optimization Using Advanced Data Sharing Platforms: ePICenter Projects' Case / Z. Paladin et al. *Proceedings of the 37th Bled eConference – Resilience Through Digital Innovation: Enabling the Twin Transition*, Bled, Slovenia, 9-12 June 2024. Pp. 403-420. DOI: <https://doi.org/10.18690/um.fov.4.2024.23>.
- [8] Buravtsova J. Implementation of river electronic navigation systems and onshore information services on the inland waterways of Ukraine. *Shipping & Navigation*. 2021. Vol. 32(2). Pp. 10-17. DOI: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.10-17>.
- [9] Skocibusic M.B., Brnardic M. Integrated vessel traffic management systems in the function of inland waterway traffic optimization. *Telematics in the Transport Environment. TST 2012. Communications in Computer and Information Science*. 2012. Vol. 329.

Pp. 117-123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-34050-5_14.

- [10] A systematic literature review of technological developments and challenges for inland waterways freight

transport in intermodal supply chain management / S. Gbako et al. *Benchmarking an International Journal*. 2024. Vol. 32, no. 1. Pp. 398-431. DOI: <https://doi.org/10.1108/bij-03-2023-0164>.

DIGITAL TECHNOLOGIES FOR TRACING AND TRACKING VESSELS ON INLAND WATERWAYS

Dolynska N.B.

postgraduate student, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1347-0538>, e-mail: tala.borisovna2011@gmail.com;

Kalinichenko Ye.V.

PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

The article explores the possibilities of using modern digital technologies to solve the problems of ensuring an adequate level of shipping safety. In particular, the use of automatic vessel identification systems, river information services, geographic information systems, big data processing technologies, and Industry 4.0 tools is considered. Attention is focused on the need to integrate digital technologies to create a single information environment that allows for the full exchange of navigational, hydrographic and meteorological information between all participants in the transportation process. The study classifies the information needs of users of ship monitoring systems depending on the types of information (dynamic, semi-dynamic and static), and defines the functional requirements for digital ship tracking and tracking systems. It is established that to increase the efficiency of such systems, it is necessary to ensure a high speed of updating information in real time, compatibility of data exchange formats, integration with existing shipping management systems, and the possibility of using predictive models to make optimal management decisions. The results of the study confirm the feasibility of introducing integrated digital platforms that combine the capabilities of modern information technologies to improve the quality of navigation management on inland waterways. The article formulates recommendations for the further development of intelligent systems for monitoring and tracking ships, which include the integration of digital solutions based on artificial intelligence and big data processing technologies, the development of a unified digital architecture for ship traffic management, and the introduction of modern methods for forecasting and analyzing navigation risks. The results obtained are of practical importance for the design and implementation of modern information systems in the field of inland waterway transport, contributing to the competitiveness and sustainable development of the transport industry in Ukraine and the European Union.

Keywords: digital technologies, inland waterways, navigation safety, ship tracking, ship escort, information systems, shipping safety, transport logistics.

References

- [1] A.V. Bazylev, and V.I. Plyushchayev, «Digital information system for inland water transport vessels based on AIS», *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2131(3), article 032031, 2021. doi: [10.1088/1742-6596/2131/3/032031](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032031).
- [2] R. Pfliegl, and A. Bäck, «Increasing the Attractiveness of Inland Waterway Transport with E-Transport River Information Services», *Transportation Research Record*, vol. 1963(1), pp. 15-22, 2006. doi: [10.1177/0361198106196300103](https://doi.org/10.1177/0361198106196300103).
- [3] S. Watanabe, K. Hasegawa, and P. Rigo, «Inland Waterway Traffic Simulator», in Proc. of the 7th Int. Conf. «Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries», Liege, Belgium, 2008, pp. 578-588.
- [4] J.F. Restrepo-Arias, J.W. Branch-Bedoya, J.A. Zapata-Cortes, E.G. Paipa-Sanabria, and M.A. Garnica-López, «Industry 4.0 Technologies Applied to Inland Waterway Transport: Systematic Literature Review», *Sensors*, vol. 22(10), article 3708, 2022. doi: [10.3390/s22103708](https://doi.org/10.3390/s22103708).
- [5] I.T. Broeke, C. Willems, and C. Glansdorp, «River Information Services: a joint European effort to enhance safety and usability of the inland waterway», in Proc. of the IEEE Intelligent Transportation Systems ITSC 2001, Oakland, California, USA, 2001, pp. 1108-1115. doi: [10.1109/itsc.2001.948817](https://doi.org/10.1109/itsc.2001.948817).
- [6] Z. Paladin et al., «A maritime big data framework integration in a common information sharing environment», in Proc. of the 45th Jubilee Int. Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Opatija, Croatia, 2022, pp. 1161-1166. doi: [10.23919/mipro55190.2022.9803777](https://doi.org/10.23919/mipro55190.2022.9803777).
- [7] Z. Paladin, M. Šorović, S. Bauk, and F. Knoors, «Maritime Transport And Logistics Digital Solutions Optimization Using Advanced Data Sharing Platforms: ePICenter Projects' Case», in Proc. of the 37th Bled eConference – Resilience Through Digital

Innovation: Enabling the Twin Transition, Bled, Slovenia, 2024, pp. 403-420. doi: **10.18690/um.fov.4.2024.23.**

- [8] J. Buravtsova, «Implementation of river electronic navigation systems and onshore information services on the inland waterways of Ukraine», *Shipping & Navigation*, vol. 32(2), pp. 10-17, 2021. doi: **10.31653/2306-5761.32.2021.10-17.**

- [9] M.B. Skocibusic, and M. Brnardic, «Integrated vessel traffic management systems in the function of inland waterway traffic optimization», in Proc. of the Telematics in the Transport Environment TST 2012, Communications in Computer and Information

Science, 2012, vol. 329, pp. 117-123. doi: **10.1007/978-3-642-34050-5_14.**

- [10] S. Gbako, D. Paraskevakakis, J. Ren, J. Wang, and Z. Radmilovic, «A systematic literature review of technological developments and challenges for inland waterways freight transport in intermodal supply chain management», *Benchmarking an International Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 398-431, 2024. doi: **10.1108/bij-03-2023-0164.**

Стаття надійшла 21.04.2025

Стаття прийнята 11.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Долинська Н.Б., Калініченко Є.В. Цифрові технології відстеження та супроводження суден на внутрішніх водних шляхах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 50. С. 226-234. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336406>.

**ІНТЕГРОВАНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТА АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ МОРСЬКОГО СУДНА
В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА****Никитюк П.В.**ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-5905-3807>, e-mail: gelaevnyk@gmail.com;**Мельник О.М.**д-р техн. наук, професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>, e-mail: m.onmu@ukr.net

У статті запропоновано інтегровану модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна, яка враховує часову динаміку ризику, технічний стан підсистем, ефективність бар'єрів безпеки та вплив зовнішнього середовища. Модель базується на ймовірнісному підході та охоплює узагальнені індикатори безпеки: інтегрований індекс ризику, запас безпеки, прогнозований час до критичного стану і індекс стійкості системи. Розроблений алгоритм передбачає послідовний моніторинг параметрів, оцінку ризиків у підсистемах судна, моделювання деградації бар'єрів та динамічну агрегацію загального ризику. Верифікація проведена на основі восьми сценаріїв: від базового до стресових ситуацій (втрати живлення, комбінований вплив, інтенсивне маневрування тощо). Особливістю моделі є поєднання математичного моделювання з алгоритмічною логікою реагування, що включає умови активації захисту та адаптацію параметрів у реальному часі. Застосування часових рядів та LSTM-моделі для прогнозування ризику забезпечує випереджальне виявлення загроз і прийняття рішень ще до настання критичних ситуацій. Запропонована система може бути інтегрована в інтелектуальні платформи управління безпекою, зокрема в умовах автономного чи напівавтономного судноплавства. Модель має модульну структуру, що забезпечує її гнучкість і масштабованість для різних типів суден. Завдяки використанню вагових коефіцієнтів критичності підсистем, можлива адаптація логіки оцінювання під конкретні архітектури та експлуатаційні режими суден. У роботі особливу увагу приділено верифікації результатів на основі симульованих сценаріїв, які демонструють залежність індексу ризику та запасу безпеки від впливу окремих факторів, що дає змогу не лише здійснювати аналіз постфактум, але й активно формувати захисні стратегії, що є актуальним у контексті переходу до інтелектуальних систем управління на морському транспорті. Практична цінність моделі полягає у її здатності не лише оцінювати поточний рівень безпеки, а й формувати рекомендації щодо зміни швидкості, маршруту або режиму завантаження судна. Такий підхід забезпечує проактивне управління безпекою в умовах високої невизначеності та багатофакторних загроз.

Ключові слова: морський транспорт, експлуатаційна безпека судна, підтримка прийняття рішень, інтегрований індекс ризику, технічний стан, запас безпеки, часове моделювання, деградація бар'єрів, адаптивне управління, LSTM-прогнозування, алгоритм реагування, критичний час, процес навігації, автономне судноплавство, сценарне моделювання, ризик-орієнтована логіка.

Постановка проблеми

Зростаюча складність судових систем, автоматизація процесів управління та підвищення вимог до безпеки в умовах автономного плавання зумовлюють необхідність створення інтегрованих моделей аналізу експлуатаційного ризику. Традиційні підходи, такі як Fault Tree Analysis (FTA), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) чи HAZOP забезпечують лише часткове охоплення багатофакторних взаємодій, не враховуючи часову деградацію бар'єрів безпеки, кумулятивний ефект технічного зносу систем та варіативність сценаріїв роботи судна. Особливо критично це для суден, які працюють у складних навігаційних умовах або виконують місії спеціального призначення, де вкрай важливе прийняття рішення є ключовою.

Забезпечення експлуатаційної безпеки суден в умовах зростаючої складності технічних систем, інтенсифікації навігаційних процесів і нестабільного морського середовища потребує нових підходів до оцінки та управління ризиками. Існуючі методи здебільшого орієнтовані на статичну або компонентну оцінку

окремих загроз і не враховують кумулятивний ефект, деградацію бар'єрів безпеки та часову динаміку зміни ризику. Недостатньо розробленими залишаються моделі, що дозволяють об'єднати в єдину інтеграційну структуру технічні, інформаційні та ситуаційні фактори небезпеки, а також сформувати основу для адаптивного контролю і прогнозного реагування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження у сфері експлуатаційної безпеки морського транспорту демонструють зростаючу інтеграцію комп'ютерних технологій, методів машинного навчання та залучення ймовірнісного аналізу в системи оцінки ризику. Зокрема, значна увага приділяється застосуванню алгоритмів глибокого навчання для прогнозування поведінки суден у реальному середовищі [1], оцінки наслідків аварій [2] та побудови моделей траєкторії руху [3]. Дослідження [4, 5] акцентують увагу на ролі безпекових бар'єрів і пропонують методи їх кількісного оцінювання у межах операційного ризику судноплавства. Інші роботи [6-8] вивчають вплив

операційних обмежень, довготривалих навантажень та змін навколишнього середовища на стійкість та вразливість суден. У [9-11] запропоновано інтегровані підходи до оптимізації маршрутів переходу суден, управління часом затримками в портах та адаптації портової інфраструктури до суден автономного типу. Розширення методів прогнозування експлуатаційного стану судового обладнання [12], енергоефективності [13-15] та системного управління [16] створює підґрунтя для побудови багаторівневих інтелектуальних моделей. Окремо варто відзначити підходи, що об'єднують елементи штучного інтелекту, байєсівських мереж і нейромережевого контролю для аналізу поведінкових сценаріїв та оцінки впливу людського фактору на судні в умовах аварій [17, 18]. У межах дослідження експлуатаційної безпеки суден ключову роль відіграють інтегровані підходи до оцінки ризиків та аналізу деградації систем. Наукова праця [19] демонструє важливість мультифізичного моделювання для складних технічних систем, що є релевантним для морської галузі, в [20] представлено вейвлет-аналіз як інструмент для виявлення резонансних загроз у швартових умовах. В роботі [21] застосовано глибокі нейромережі для підвищення операційної ефективності суден у портах, що відображає сучасні тенденції цифровізації. Наукові публікації [22-25] фокусуються на стресових факторах, адаптивному управлінні безпекою, сучасних системах курсовказання та інформаційній безпеці суден, формуючи концептуальну основу для створення моделей, які враховують деградацію бар'єрів, індекс ризику $SIRI$ та адаптивне реагування.

Таким чином, актуальною залишається задача формування інтегрованої, сценарно-чутливої моделі оцінювання ризику, що може адаптуватися до змінних умов, прогнозувати критичні стани та підтримувати прийняття рішень у реальному часі. Наявні підходи до оцінки безпеки морських суден є фрагментарними та недостатньо адаптивними в умовах змінного середовища. Відсутність механізмів об'єднання різномірних даних у єдину динамічну модель ускладнює оперативну діагностику та управління ризиками на борту. Зокрема, бракує ефективних моделей, які б поєднували технічну інформацію з поведінковими сценаріями ризику, що змінюються в часі.

Мета статті

Метою дослідження є розробка та верифікація інтегрованої ймовірнісної моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна, здатної враховувати часову динаміку технічного стану, ефективність бар'єрів безпеки, зовнішні ризики та забезпечувати адаптивне управління ризиком в умовах змінного середовища. Для досягнення цієї мети сформульовано низку наукових завдань, зокрема: критичний аналіз сучасних методів оцінки експлуатаційної безпеки суден з урахуванням їх обмежень у динамічних умовах; побудова математичної моделі інтегрованого ризику з урахуванням

деградації бар'єрів, ймовірностей технічних відмов та зовнішніх факторів; формування узагальнених індикаторів безпеки, а саме індексу ризику ($SIRI$), запасу безпеки (M) та прогнозованого часу до досягнення критичного стану (T_{crit}). Додатково було реалізовано серію симуляційних сценаріїв для аналізу поведінки системи в умовах типових загроз, розроблено адаптивний алгоритм управління з візуалізацією логіки реагування, а також верифіковано точність і ефективність моделі.

Виклад основного матеріалу

Безпека морських суден в умовах динамічного середовища, технічної невизначеності та зростаючої складності судових систем залишається однією з ключових проблем експлуатації сучасного морського транспорту. З огляду на інтенсивний розвиток автономних навігаційних систем, комп'ютерних технологій і зростання обсягів міжнародних перевезень, питання оперативного моніторингу, оцінки та управління ризиками набуває особливої актуальності. Класичні моделі безпеки здебільшого обмежені аналізом статичних факторів і не враховують сукупний, часовий та інтегрований вплив зовнішніх та внутрішніх загроз. Такий підхід є недостатнім у контексті зростаючої складності сценаріїв функціонування сучасного судна.

У відповідь на такі виклики в даному дослідженні запропоновано інтегровану ймовірнісну модель експлуатаційної безпеки, яка дозволяє оцінювати ризики в режимі реального часу, адаптивно реагувати на їх зміну, а також прогнозувати ймовірність настання критичних подій. Модель охоплює технічний стан судових підсистем, ефективність захисних бар'єрів та зовнішні фактори середовища, що в сукупності формують динамічний індекс ризику. Особливістю підходу є поєднання математичного моделювання, аналізу сценаріїв, побудови інтегрованих індикаторів ($SIRI$, M , T_{crit}) та елементів адаптивного контролю. Запропонований методологічний апарат апробовано на основі моделювання типових судових сценаріїв з аналізом часових рядів та реалізацією алгоритмів прогнозування.

Для чисельної реалізації інтегрованої моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна розроблено покроковий алгоритм симуляції, який враховує часову деградацію ефективності бар'єрів, зміну ймовірностей відмов підсистем, адаптацію вагових коефіцієнтів критичності, а також прогноз часу досягнення критичного рівня ризику. Алгоритм реалізований у вигляді циклічного процесу з динамічним оновленням параметрів у кожен момент часу (рис. 1).

У рамках моделювання застосовано покроковий алгоритм чисельної реалізації інтегрованої моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна. Алгоритм базується на ітераційному підході з динамічним оновленням усіх ключових параметрів у кожен дискретний момент часу.

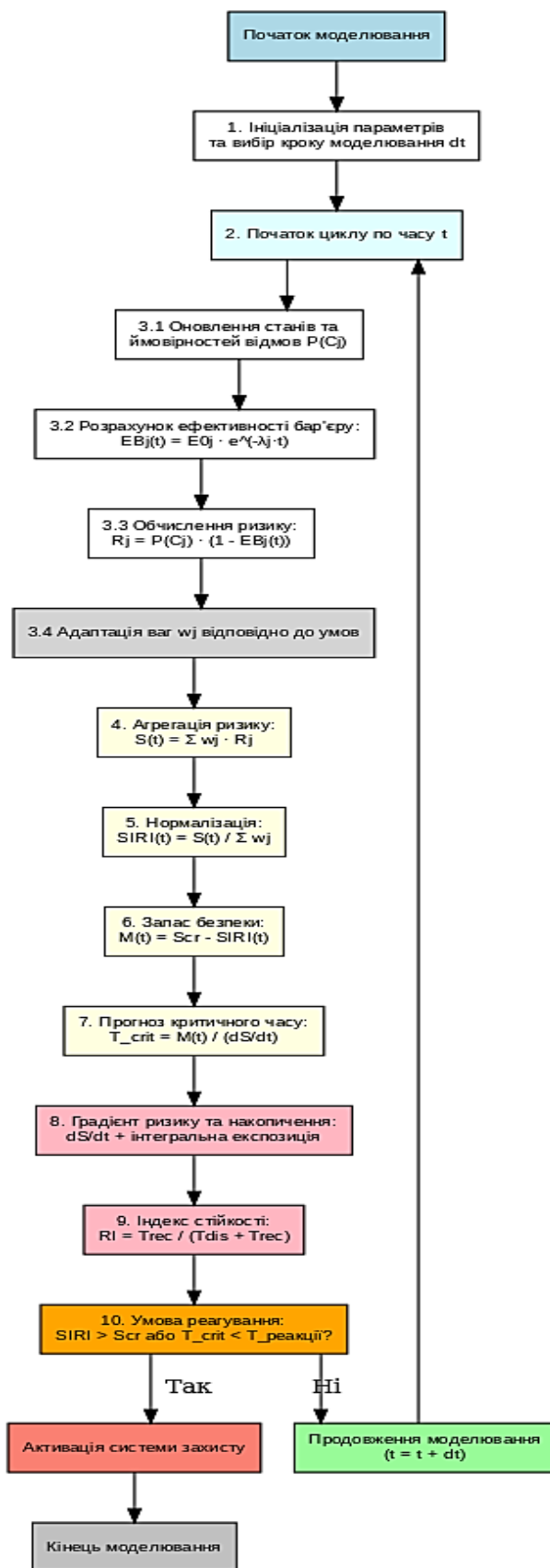


Рис. 1 – Алгоритм симуляційного моделювання оцінки інтегрованого ризику судна

На першому етапі здійснюється ініціалізація: встановлюються початкові значення параметрів кожної підсистеми – початкова ймовірність відмови, ефективність бар'єрів безпеки, коефіцієнти деградації та вагові коефіцієнти критичності. Задається також тривалість симуляції та часовий крок інтегрування.

Далі запускається основний часовий цикл, в межах якого відбувається послідовна симуляція для кожного моменту часу t . На кожній ітерації оновлюються ймовірності відмов підсистем $P(C_j)$ відповідно до моделювання їх поточного стану та зовнішніх умов. Паралельно виконується обчислення ефективності захисних бар'єрів на основі експоненційної деградаційної функції $E_{Bj}(t)$.

У наступному блоці визначається ризик кожної підсистеми, що враховує втрату захисної функції бар'єрів. При необхідності реалізується динамічне коригування вагових коефіцієнтів w_j , що відображають критичність відповідної підсистеми у загальній структурі судна.

Сумарний ризик агрегується у загальний індекс безпеки $S(t)$, який нормалізується до інтегрованого індексу ризику $SIRI(t)$. Подальше моделювання передбачає обчислення запасу безпеки $M(t)$, а також прогноз часу до досягнення критичного рівня ризику T_{crit} . На завершальних етапах здійснюється оцінка швидкості зміни ризику dS/dt , розрахунок кумулятивного впливу та індексу стійкості системи RI . Система перевіряє умови для активації протоколу реагування перевищення $SIRI$ заданого порогу або наближення T_{crit} до допустимого інтервалу дій. У разі досягнення критичних значень активується блок безпеки, імітуючи сценарій

автоматизованого реагування. Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє не лише відстежувати поточний рівень ризику, а й адаптивно прогнозувати майбутні загрози, забезпечуючи функціональну підтримку рішень для своєчасного реагування у складних умовах експлуатації суден.

Аналіз сценаріїв експлуатації судна.

Для демонстрації гнучкості та прикладного потенціалу інтегрованої моделі оцінки експлуатаційної безпеки було проведено імітаційне моделювання восьми типових сценаріїв. Сценарії охоплюють як стандартні умови експлуатації, так і кризові ситуації, пов'язані з деградацією підсистем, збоєм бар'єрів або екстремальними навантаженнями. Такий підхід дозволяє відобразити варіативність ризикових профілів сучасних суден та оцінити здатність системи адаптуватися до змін середовища.

Одним із ключових етапів валідації інтегрованої моделі є перевірка її ефективності в умовах різноманітних експлуатаційних сценаріїв судна. Такий підхід дозволяє оцінити стійкість системи до змін зовнішніх факторів і внутрішнього технічного стану, протестувати динаміку показників безпеки та адаптивність запропонованої моделі. Було реалізовано симуляцію восьми реалістичних сценаріїв: базового режиму, погіршення погодних умов, втрати бар'єрів безпеки, комбінованого впливу, критичних навантажень, втрати живлення, збоїв процесу навігації та інтенсивного маневрування. В таблиці 1 наведено результати розрахунків інтегрованого індексу ризику ($SIRI$) та відповідного запасу безпеки (M), які відображають зміну рівня загрози залежно від сценарію.

Таблиця 1

Результати моделювання індексу ризику ($SIRI$) та запасу безпеки (M)

Сценарій	Індекс ризику $SIRI$	Запас безпеки M
Базовий	0.0489	0.0011
Погіршення погоди	0.0475	0.0025
Втрата бар'єра	0.0477	0.0023
Комбінований вплив	0.0424	0.0076
Критичне навантаження	0.0391	0.0109
Втрати живлення	0.0370	0.0130
Збої процесу навігації	0.0385	0.0115
Інтенсивне маневрування	0.0442	0.0058

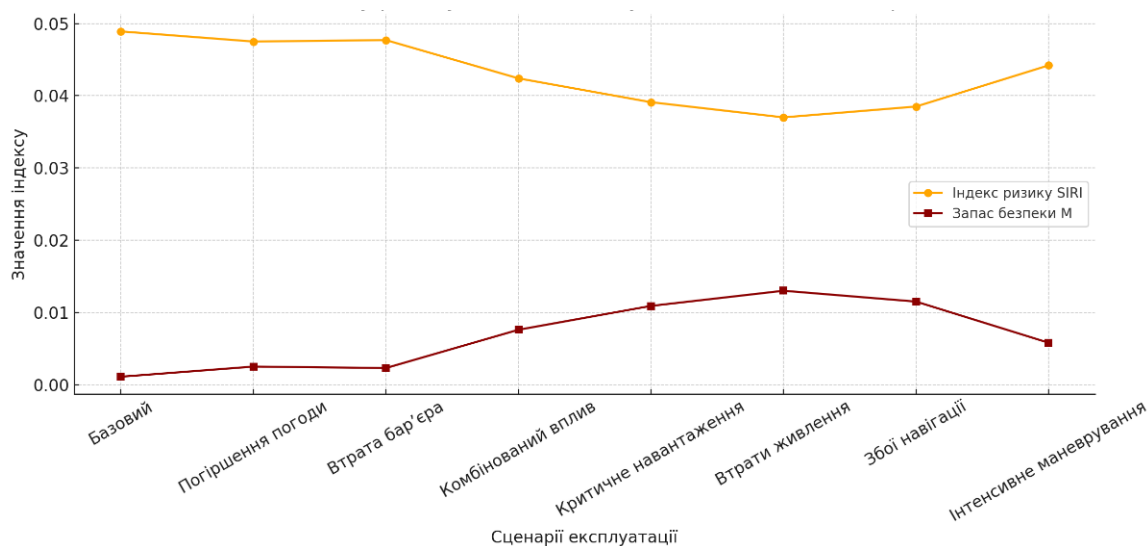
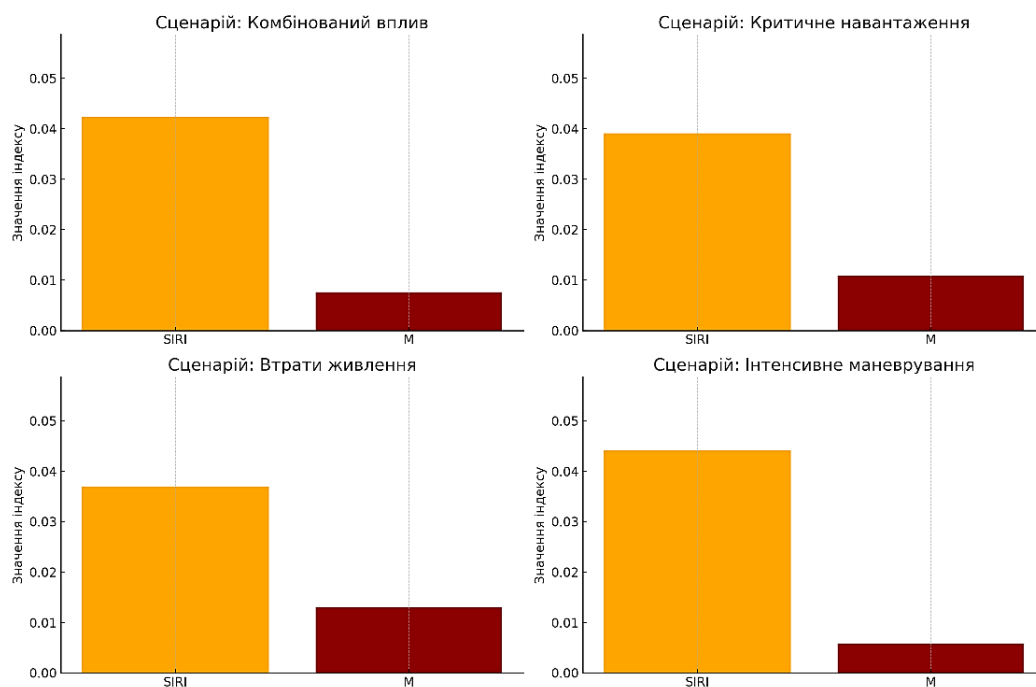
Як видно з представлених даних комбінований вплив характеризується зростаючим ризиком через сукупність зовнішніх факторів (погодні умови) та технічної деградації. Індекс $SIRI$ зменшується, однак запас безпеки M також помірний коли система функціонує на межі допустимого режиму. Критичне навантаження демонструє суттєве зменшення $SIRI$ та збільшення запасу безпеки. Це вказує на адаптивність системи до пікових навантажень за рахунок стратегії попередження ризику. Втрати живлення супроводжуються нижчим $SIRI$ та одним із найвищих значень M серед усіх сценаріїв, що свідчить про добру компенсаційну здатність

інших підсистем і правильну роботу бар'єрів. Інтенсивне маневрування демонструє повторне зростання ризику через нестабільність навігаційних параметрів, що формує ситуацію, близьку до порогу безпеки. Це підкреслює необхідність моніторингу таких умов у реальному часі.

Результати дослідження представлено на Рисунку 2, де графічно відображено динаміку індексу ризику $SIRI$ та запасу безпеки M в умовах реалізації різних сценаріїв. Зі зростанням складності сценаріїв система демонструє зниження загального ризику завдяки активації запобіжних бар'єрів та адаптивній корекції

критичності підсистем. Найбільш небезпечним виявився сценарій інтенсивного маневрування, за якого зафіксовано стрімке зростання *SIRI* та зниження запасу безпеки, що вказує на необхідність негайного реагування. Водночас, у сценаріях «Втрати живлення» та «Критичне навантаження» система продемонструвала проактивну поведінку, що дозволило забезпечити найбільше зростання запасу безпеки *M* і відповідно знизити критичність загального ризику.

Для деталізації впливу конкретних стресових умов на поведінку інтегрованої системи безпеки було проведено окремий аналіз чотирьох характерних сценаріїв: комбінованого впливу, критичного навантаження, втрати живлення та інтенсивного маневрування. На рисунку 3 представлено порівняльні діаграми, які ілюструють зміну значень інтегрованого індексу ризику (*SIRI*) та відповідного запасу безпеки (*M*) для кожного із зазначених сценаріїв.

Рис. 2 – Індекс *SIRI* та запас безпеки за сценаріямиРис. 3 – Зміна індексу ризику (*SIRI*) та запасу безпеки (*M*) у критичних сценаріях експлуатації судна

У цих кейсах видно динаміку ризику особливо те, що комбінований вплив має помірне зниження *SIRI* при збереженні мінімального запасу безпеки. Проте критичне навантаження демонструє найменший індекс ризику та стабільний запас. Втрати живлення показує найкраще значення *M*, що свідчить про ефективну компенсацію ризику. У випадку інтенсивного маневрування знову повторне зростання *SIRI*, що є важливою ознакою для активації моніторингу.

Одним з ключових елементів забезпечення експлуатаційної безпеки судна є своєчасне прогнозування моменту переходу однієї з суднових системи в небезпечний або критичний стан. Для цього в моделі інтеграційного ризику було реалізовано розрахунок часу до критичного рівня ризику T_{crit} , що базується на

поточному значенні загального індексу безпеки *S*, запасу безпеки *M* і швидкості зміни ризику dS/dt .

Для розуміння залежності між індексом ризику, запасом безпеки та часом до досягнення критичного стану (T_{crit}) побудовано поверхневу модель (Рисунк 4), яка дозволяє просторово візуалізувати динаміку поведінки системи та виявити «зони безпеки» або області, де низький ризик поєднується з достатнім запасом часу. У верхньому правому секторі графіка чітко видно, що T_{crit} значно більший за порогове значення (понад 10 умовних одиниць часу), що дає системі простір для адаптації. Натомість у лівому нижньому секторі при високому значенні *SIRI* та малому значенні *M* система входить у зону критичної нестабільності, що вимагає негайної активації протоколів реагування.

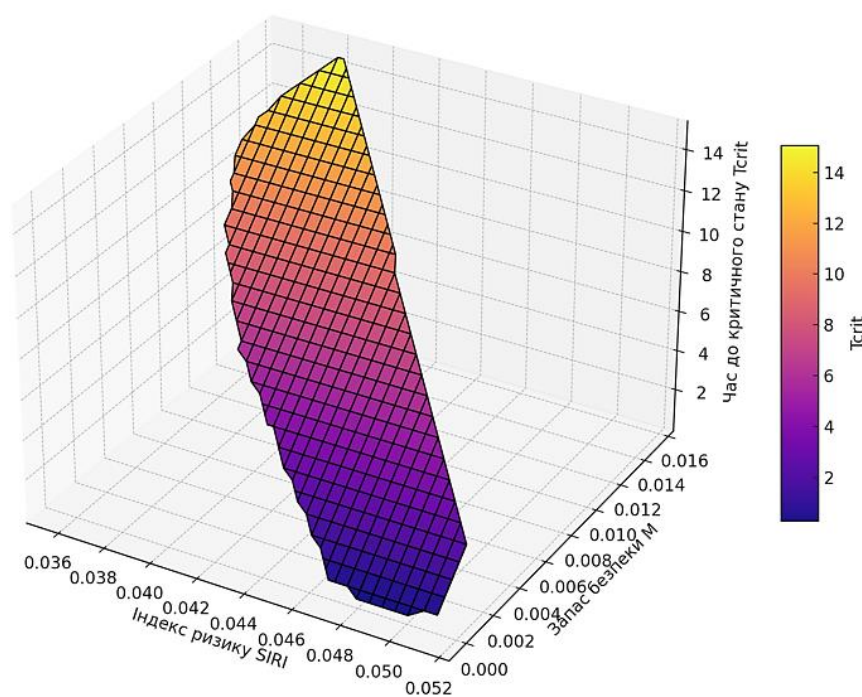


Рис. 4 – Залежність T_{crit} відносно *SIRI* та *M* за основними сценаріями

З аналізу графіка видно, що найбільше значення прогнозованого часу до критичного стану (T_{crit}) досягається при поєднанні низького ризику *SIRI* та високого запасу безпеки *M*. Такі сценарії, як наприклад, «Втрати живлення» або «Критичне навантаження» свідчать про ефективну реакцію системи на потенційну загрозу. Навпаки, сценарії «Інтенсивне маневрування» та «Комбінований вплив» демонструють зниження запасу часу та зростання ризику, що потребує активації відповідних протоколів реагування. Також наочно продемонстровано, як взаємодія трьох параметрів дозволяє не лише оцінити поточний стан судна, а й передбачити момент, коли система потребуватиме переходу до безпечного режиму.

Проведене моделювання підтвердило адаптивність запропонованої моделі до різних сценаріїв

експлуатації. Інтеграція параметрів деградації, зміни ризику та обчислення запасу безпеки дозволяє не лише оцінювати поточний стан, а й робити прогноз ситуацій наближення до критичного рівня. Представлені результати демонструють практичну цінність моделі для реального застосування в системах управління безпекою суден із різним рівнем автоматизації.

Прогнозування індексу ризику для раннього виявлення критичних станів.

У рамках дослідження розроблена методика короткотермінового прогнозування індексу експлуатаційного ризику судна (*SIRI*) на основі часових рядів. Такий підхід дозволяє виявляти небезпечні тренди ще до досягнення критичних значень, що є ключовим для своєчасного реагування в умовах змінного технічного стану або морехідного стану судна та зовнішнього

середовища. Для демонстрації можливостей прогнозу обрано два сценарії: «Комбінований вплив» та «Інтенсивне маневрування», які раніше ідентифіковано як зони підвищеного ризику.

Часові ряди формувались як симульовані послідовності з реалістичною динамікою зміни $SIRI$, характерною для кожного сценарію. Надалі на основі аналітичного наближення тренду виконано прогноз на 10 часових кроків уперед. Так, комбінований вплив, де ризик зростає поступово, прогноз показує тенденцію до наближення до критичного рівня (0.05), але ще в межах допустимого, а у випадку інтенсивного маневрування тренд більш різкий, адже прогнозований $SIRI$ може вийти за межі безпечного значення вже через кілька кроків, що сигналізує про необхідність попереджувальних заходів.

Аналіз графіків показує, що сценарій «Комбінований вплив» демонструє поступове наближення до критичного рівня ризику (0.05), однак запас часу до небезпечного стану дозволяє заздалегідь ініціювати компенсаторні дії. Натомість у сценарії «Інтенсивне маневрування» спостерігається стрімкий ріст індексу $SIRI$, і

прогнозоване перевищення порогу безпеки відбувається вже в перших кроках прогнозу.

Таким чином, навіть проста модель тренду дозволяє сформувати основу для превентивного реагування, що є особливо актуальним для автоматизованих систем навігації та безпеки, а її подальше удосконалення може бути реалізоване через застосування нейромережових методів (LSTM) або інтеграцію з реальними сенсорними потоками та адаптацію до конкретних типів суден.

Автоматизоване прийняття рішень на основі прогнозу ризику.

Для забезпечення оперативного реагування системи суднової безпеки запропоновано алгоритм прийняття рішень, який базується на прогнозованому значенні індексу ризику $SIRI_{t+\Delta t}$, а також оцінці часу до досягнення критичного рівня T_{crit} . Залежно від поєднання цих двох параметрів система може ініціювати різні типи реакцій, від превентивного контролю до повної активації аварійного режиму, що узагальнено в Таблиці 2.

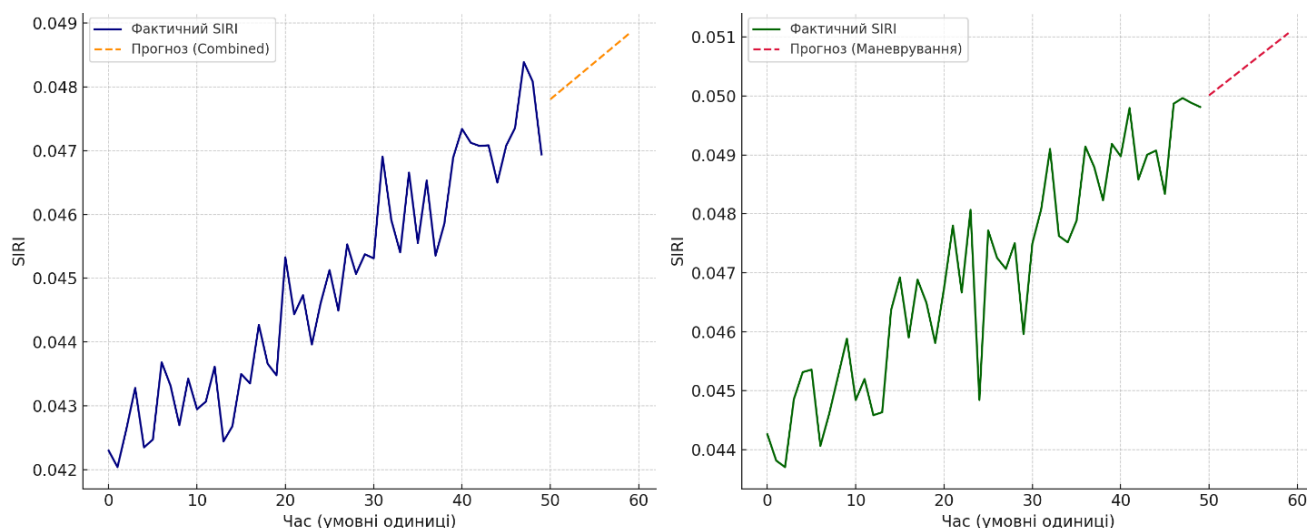
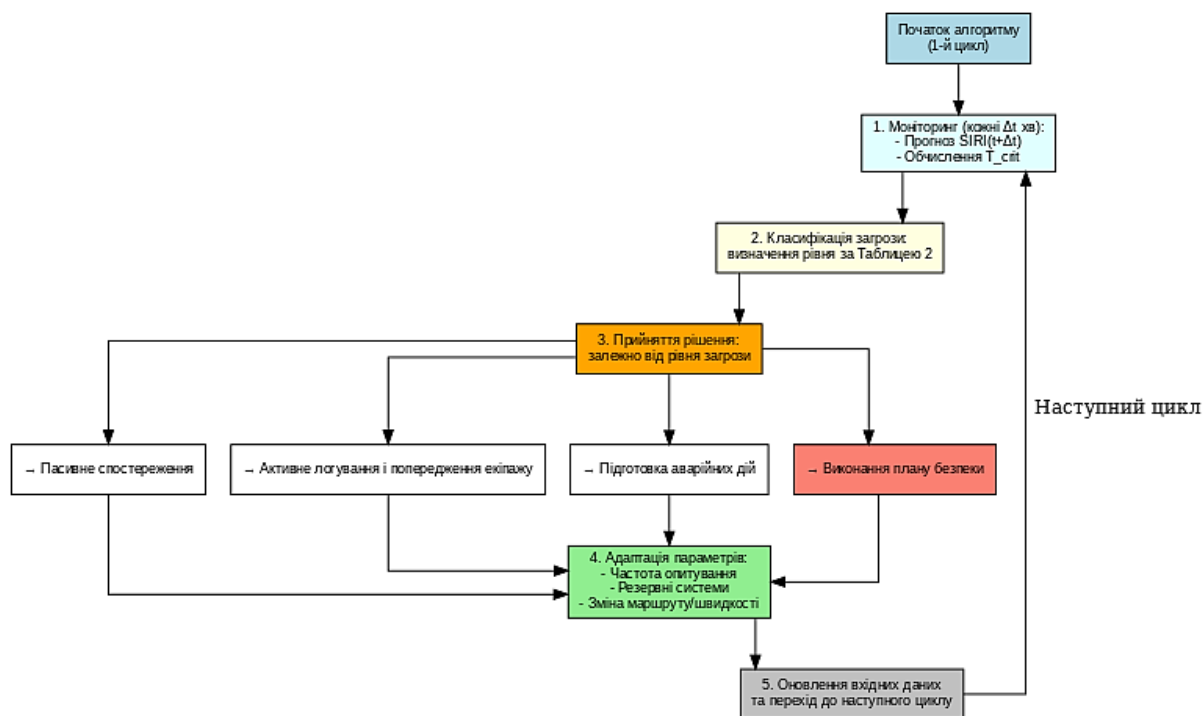


Рис. 5 – Прогноз $SIRI$ для сценаріїв «Комбінований вплив» та «Інтенсивне маневрування»

Таблиця 2

Логіка прийняття рішень системою управління безпекою на основі прогнозу

№	Прогнозований $SIRI$	Прогнозований T_{crit} , хв	Рівень загрози	Автоматизовані дії системи
1	< 0.045	> 30	Низький	Моніторинг, записи подій
2	0.045–0.048	15–30	Помірний	Попередження екіпажу, діагностика
3	0.048–0.050	5–15	Високий	Підготовка до переключення систем
4	> 0.050	< 5	Критичний	Активація протоколу аварійного реагування

Рис. 6 – Алгоритм адаптивного контролю суднової безпеки на основі прогнозованих показників $SIRS$ та T_{crit}

Таким чином, прогнозоване значення індексу $SIRS$ дозволяє класифікувати рівень ризику, а прогнозований запас часу T_{crit} визначити терміновість реагування. Автоматизована система може не лише видавати попередження, а й адаптувати конфігурацію бортових систем, активувати резерви, змінювати маршрут або обмежувати навігаційні маневри залежно від ступеня небезпеки.

Інтеграція прогнозних моделей у систему безпеки експлуатації суден дозволяє реалізувати не лише оцінку поточного стану, а й проактивне керування. На рис. 6 представлено структуровану блок-схему роботи адаптивного контролера, що функціонує за принципом циклічного аналізу параметрів ризику та динамічного реагування. Алгоритм побудовано як послідовність із п'яти основних кроків, кожен з яких адаптується до змін зовнішнього середовища та внутрішніх характеристик судна.

Алгоритм складається з наступних основних етапів:

1. Моніторинг, де у кожному циклі (Δt) виконується прогнозування індексу ризику $SIRS_{t+\Delta t}$ та обчислення прогнозованого часу до критичного стану T_{crit} ;
2. Класифікація загрози, на підставі даних з Таблиці 2 визначається рівень загрози, що активує відповідний шлях реагування;
3. Прийняття рішення, де визначається тип реагування, від пасивного спостереження до активації плану захисту;

4. Виконання дій, де реалізуються відповідні сценарії зміна параметрів, попередження екіпажу, активація дубльованих систем, переключення маршруту;

5. Циклічне оновлення, коли система переходить до наступного циклу з оновленими даними, забезпечуючи динамічну адаптацію.

Таким чином, представлений алгоритм забезпечує замкнуте керування безпекою судна в умовах невизначеності, дозволяючи як уникнути ризиків, так і зменшити наслідки при настанні небезпечних подій. Адаптація логіки до різних типів суден та умов експлуатації відкриває перспективи впровадження в системи автономного судноводіння.

Висновки

У даному дослідженні розроблено та верифіковано інтегровану модель оцінки експлуатаційної безпеки морського судна, яка поєднує математичне моделювання, сценарну симуляцію, адаптивний контроль і прогноз ризику в режимі реального часу. Запропонована модель враховує технічний стан підсистем, ефективність бар'єрів безпеки, зовнішні ризики та часову динаміку деградації, що дозволяє підвищити точність оцінки загроз і ефективність прийняття рішень у змінному середовищі.

Моделювання типових сценаріїв експлуатації підтвердило здатність системи виявляти критичні стани на ранніх етапах, адаптивно реагувати на зміну параметрів та забезпечувати обґрунтовану діагностику ситуацій. Побудовані індикатори індекс ризику, запас

безпеки та прогнозований час до критичного стану забезпечують інформативну основу для інтеграції в системи управління судновою безпекою. Алгоритм прогнозування ризику та адаптивного реагування дозволяє своєчасно активувати протоколи захисту та оптимізувати навігаційні стратегії. Практична цінність моделі підтверджена результатами симуляції, що охоплюють як нормальні, так і стресові режими функціонування судна. Подальший розвиток моделі можливий через інтеграцію сенсорних потоків даних, машинного навчання (зокрема LSTM) та персоналізацію для різних типів суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Zhang M., Kujala P., Hirdaris S. A machine learning method for the evaluation of ship grounding risk in real operational conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 226. Article 108697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108697>.
- [2] A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions / M. Zhang et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 145. Article 110158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.
- [3] A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions / M. Zhang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Article 114905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114905>.
- [4] Deng W., Ma X., Qiao W. A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 243. Article 109884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.
- [5] Deng W., Ma X., Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 139. Article 104581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.
- [6] Bulian G., Francescutto A. Level 1 vulnerability criterion for the dead ship condition: A practical methodology for embedding operational limitations. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. Article 113868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113868>.
- [7] Mauro F., Vassalos D. The effect of the operational environment on the survivability of passenger ships. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 281. Article 114786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114786>.
- [8] Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model / R. Miratsu et al. *Marine Structures*. 2022. Vol. 86. Article 103293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103293>.
- [9] Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach / Karimi N., Javanmardi E., Nadaffard A., Facchini F. *Ocean & Coastal Management*. 2025. Vol. 263. Article 107620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.
- [10] RouteView 2.0: A Real-time Operational Planning System for Vessels on the Arctic Northeast Passage / A. Wu et al. *Environmental Modelling & Software*. 2025. Vol. 191. Article 106464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106464>.
- [11] Kurt I., Aymelek M. Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships. *Transport Policy*. 2023. Vol. 145. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.09.023>.
- [12] A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems / X. Zhou et al. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 327. Article 121000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>.
- [13] Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction / V.N. Nguyen et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 118. Pp. 664-680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.067>.
- [14] Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions / Sang Y., Ding Y., Xu J., Sui C. *Fuel*. 2023. Vol. 352. Article 129086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129086>.
- [15] Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions / A. Fan et al. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 483. Article 144252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144252>.
- [16] Modeling and operational analysis of ship integrated energy system considering partial-load characteristics of equipment and transferable loads / X. Jiang et al. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2025. Vol. 42. Article 101651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101651>.
- [17] Predicting human reliability for emergency fire pump operational process on tanker ships utilising fuzzy Bayesian Network CREAM modelling / Aydin M., Sezer S.I., Arici S.S., Akyuz E. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 314. Article 119717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119717>.
- [18] Russell D.W., Lance R., Rosopa P.J. Operational safety risk modeling in a naval organization. *Journal of Safety Research*. 2025. Vol. 93. Pp. 274-281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2025.02.025>.
- [19] Mochizuki H. Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 435. Article 113941. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.

- [20] Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds / R. Costas et al. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 247. Article 110678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>.
- [21] Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport / Guo W., Zhang X., Ge Y., Du Y. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. Vol. 197. Article 104046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.
- [22] Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2(9). С. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>.
- [23] Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32(71), № 4. С. 260-264. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/39>.
- [24] Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських судах для забезпечення навігаційної безпеки / Мельник О.М., Щербина О.В., Корякін К.С., Бурлаченко Д.А. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. № 21. С. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
- [25] Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна / О.М. Мельник та ін. *Комуніальне господарство міст*. 2021. № 6(166). С. 204-210. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

INTEGRATED MODEL OF ASSESSMENT AND ADAPTIVE MANAGEMENT OF OPERATIONAL SAFETY OF A SEA VESSEL IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

Nykytyuk P.

senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-3807>, e-mail: gelaevnyk@gmail.com;

Melnyk O.

D.Sc. (Engineering), professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>, e-mail: m.onmu@ukr.net

The article proposes an integrated model for assessing and adaptive management of the operational safety of a ship, which takes into account the temporal dynamics of risk, the technical condition of subsystems, the effectiveness of safety barriers and the impact of the external environment. The model is based on a probabilistic approach and includes generalized safety indicators: integrated risk index, safety margin, predicted time to critical condition, and system stability index. The developed algorithm provides for consistent monitoring of parameters, risk assessment in ship subsystems, modeling of barrier degradation, and dynamic aggregation of the overall risk. The verification was carried out on the basis of eight scenarios: from basic to stressful situations (power loss, combined impact, intensive maneuvering, etc.). The model features a combination of mathematical modeling and algorithmic response logic, including protection activation conditions and real-time adaptation of parameters. The use of time series and the LSTM model for risk prediction ensures proactive threat detection and decision-making before critical situations occur. The proposed system can be integrated into intelligent safety management platforms, in particular in autonomous or semi-autonomous shipping. The model has a modular structure, which ensures its flexibility and scalability for different types of vessels. Due to the use of weighting factors for the criticality of subsystems, it is possible to adapt the assessment logic to specific ship architectures and operating modes. Particular attention is paid to verifying the results based on simulated scenarios that demonstrate the dependence of the risk index and safety margin on the impact of certain factors, which allows not only post facto analysis but also the active development of protective strategies, which is relevant in the context of the transition to intelligent control systems in maritime transport. The practical value of the model lies in its ability not only to assess the current level of safety, but also to formulate recommendations for changing the speed, route, or mode of loading of the vessel. This approach ensures proactive safety management in conditions of high uncertainty and multifactorial threats.

Keywords: maritime transport, operational safety of a vessel, decision support, integrated risk index, technical condition, safety margin, time modeling, barrier degradation, adaptive control, LSTM prediction, response algorithm, critical time, navigation process, autonomous navigation, scenario modeling, risk-based logic.

References

- [1] M. Zhang, P. Kujala, and S. Hirdaris, «A machine learning method for the evaluation of ship grounding risk in real operational conditions», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 226, article 108697, 2022. doi: [10.1016/j.ress.2022.108697](https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108697).
- [2] M. Zhang, H. Wang, F. Conti, T. Manderbacka, H. Remes, and S. Hirdaris, «A hybrid deep learning

- method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 145, article 110158, 2025. doi: **10.1016/j.engappai.2025.110158**.
- [3] M. Zhang, P. Kujala, M. Musharraf, J. Zhang, and S. Hirdaris, «A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions», *Ocean Engineering*, vol. 283, article 114905, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114905**.
- [4] W. Deng, X. Ma, and W. Qiao, «A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 243, article 109884, 2024. doi: **10.1016/j.ress.2023.109884**.
- [5] W. Deng, X. Ma, and W. Qiao, «Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 139, article 104581, 2025. doi: **10.1016/j.trd.2024.104581**.
- [6] G. Bulian, and A. Francescutto, «Level 1 vulnerability criterion for the dead ship condition: A practical methodology for embedding operational limitations», *Ocean Engineering*, vol. 272, article 113868, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.113868**.
- [7] F. Mauro, and D. Vassalos, «The effect of the operational environment on the survivability of passenger ships», *Ocean Engineering*, vol. 281, article 114786, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114786**.
- [8] R. Miratsu, K. Sasmal, T. Kodaira, T. Fukui, and T. Zhu, T. Waseda, «Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model», *Marine Structures*, vol. 86, article 103293, 2022. doi: **10.1016/j.marstruc.2022.103293**.
- [9] N. Karimi, E. Javanmardi, A. Nadaffard, and F. Facchini, «Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach», *Ocean & Coastal Management*, vol. 263, article 107620, 2025. doi: **10.1016/j.ocecoaman.2025.107620**.
- [10] A. Wu et al. «RouteView 2.0: A Real-time Operational Planning System for Vessels on the Arctic Northeast Passage», *Environmental Modelling & Software*, vol. 191, article 106464, 2025. doi: **10.1016/j.envsoft.2025.106464**.
- [11] I. Kurt, and M. Aymelek, «Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships», *Transport Policy*, vol. 145, pp. 1-10, 2023. doi: **10.1016/j.tranpol.2023.09.023**.
- [12] X. Zhou et al., «A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems», *Ocean Engineering*, vol. 327, article 121000, 2025. doi: **10.1016/j.oceaneng.2025.121000**.
- [13] V. Nguyen, N. Chung, G. Balaji, K. Rudzki, and A. Hoang, «Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction», al. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 118, pp. 664-680, 2025. doi: **10.1016/j.aej.2025.01.067**.
- [14] Y. Sang, Y. Ding, J. Xu, and C. Sui, «Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions», *Fuel*, vol. 352, article 129086, 2023. doi: **10.1016/j.fuel.2023.129086**.
- [15] A. Fan et al., «Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions», *Journal of Cleaner Production*, vol. 483, article 144252, 2024. doi: **10.1016/j.jclepro.2024.144252**.
- [16] X. Jiang, Z. Xu, Y. Xie, H. Wang, H. Yuan, and J. Qin, «Modeling and operational analysis of ship integrated energy system considering partial-load characteristics of equipment and transferable loads», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 42, pp. 101651, 2025. doi: **10.1016/j.segan.2025.101651**.
- [17] M. Aydin, S.I. Sezer, S.S. Arici, and E. Akyuz, «Predicting human reliability for emergency fire pump operational process on tanker ships utilising fuzzy Bayesian Network CREAM modelling», *Ocean Engineering*, vol. 314, article 119717, 2024. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119717**.
- [18] D.W. Russell, R. Lance, and P.J. Rosopa, «Operational safety risk modeling in a naval organization», *Journal of Safety Research*, vol. 93, pp. 274-281, 2025. doi: **10.1016/j.jsr.2025.02.025**.
- [19] H. Mochizuki, «Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis», *Nuclear Engineering and Design*, vol. 435, article 113941, 2025. doi: **10.1016/j.nuceng-des.2025.113941**.
- [20] R. Costas, A. Figuero, E. Peña, J. Sande, and P. Rosa-Santos, «Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds», *Ocean Engineering*, vol. 247, article 110678. doi: **10.1016/j.oceaneng.2022.110678**.
- [21] W. Guo, X. Zhang, Y. Ge, and Y. Du, «Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 197, article 104046, 2025. doi: **10.1016/j.tre.2025.104046**.
- [22] O.M. Melnyk, Yu.V. Bychkovsky, «Suchasna metodyka otsinky rivniu bezpeky sudna ta shliakhy yoho pidvyshchennia» [«Modern methods of ship safety level assessment and ways of its improvement»], *Rozvytok transportu – Transport development*, № 2(9), pp. 37-46, 2021. doi: **10.33082/td.2021.2-9.03**. (Ukr.)
- [23] O.M. Melnyk, and Yu.V. Bychkovskiy, «Vrakhuvannia faktorov stresu u systemi zabezpechennia bezpeky moreplavstva» [«Stress factor in the system of the shipping safety»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni*

nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences, vol. 32(71), № 4, pp. 260-264, 2021. doi: **10.32838/2663-5941/2021.4/39**. (Ukr.)

- [24] O. Melnyk, O. V. Shcherbina, K. Koryakin, D. A. Burlachenko, «Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskyykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky» [«Overview and prospects for the use of modern course guidance systems on seagoing vessels to ensure navigational safety»], *Naukovi visti dalivskoho universytetu*, № 21, pp. 1-8, 2021. doi: **10.33216/2222-3428-2021-21-13**. (Ukr.)

- [25] O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Lohinov, V. Okulov, and I. Pulyaev, «Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna» [«Current problems of maritime safety and modern ways of ensuring ship security»], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, № 6(166), pp. 204-210, 2021. doi: **10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210**. (Ukr.)

Стаття надійшла 15.04.2025

Стаття прийнята 28.04.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Никитюк П.В., Мельник О.М. Інтегрована модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна в умовах динамічного середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 235-246. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>.

УДК 621.413.3.436

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336421

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОПОЛУМ'ЯНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ

Агєєв М.С.

д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5691-8986>, e-mail: maxageev73-73@ukr.net

При відновленні зношених поверхонь деталей суднових технічних засобів газополум'яним напиленням (ГПН) на якість відновлювального покриття впливають різні технологічні фактори, такі як дистанція напилення, кут розпилення, склад газової суміші та конструкторські особливості – товщина покриття, пористість, від яких в подальшому залежить якість покриття, ресурс відновлених деталей та надійність всього механізму [1]. Дослідження працездатності системи «покриття – основа» показали, що основною причиною їх руйнування є недостатній зв'язок між матеріалом покриття та відновлюваною поверхнею. Іншими словами, однією з найважливіших експлуатаційних характеристик деталей з ГПН-покриттями є міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею – критерій, який використовують у практиці відновлювання деталей в процесі ремонту. Адгезійні характеристики покриття визначають його працездатність. Тому у роботі експериментально встановлено вплив технологічних параметрів ГПН на працездатність відновлених поверхонь та їх функціональний зв'язок. Мета статті полягає у встановленні впливу технологічних параметрів процесу ГПН на якість відновлювального покриття, що визначає працездатність та надійність суднових технічних засобів в цілому. У результаті проведення дослідження з'ясований механізм впливу технологічних параметрів (дистанції напилення, матеріалу, склад газової суміші тощо) та конструкторських особливостей (товщини покриття, пористості) процесу ГПН на якість отриманого покриття. Урахування впливу технологічних параметрів процесу ГПН та їх функціонального зв'язку на якість отриманого покриття дає можливість керувати процесом напилення та отримувати покриття з заздалегідь встановленими властивостями. Встановлено залежність загальної пористості та адгезійної міцності ГПН-покриттів від дистанції напилення, впливу товщини покриттів на співвідношення наскрізної та загальної пористості покриттів.

Ключові слова: ГПН-покриття, технологічні параметри, суднові технічні засоби, працездатність, надійність, адгезійна міцність.

Постановка проблеми

Безперервне збільшення кількості суден, їх розмірів та швидкості веде до зростання інтенсивності руху та вимагає підвищення безпеки плавання, що значною мірою залежить від надійності всіх суднових технічних систем і засобів.

Недостатній рівень надійності – це додаткові витрати, спричинені аваріями та простоями суден, зниженням їх швидкості та збільшенням часу вантажних операцій, а також додаткові витрати на ремонт та технічне обслуговування обладнання.

Одним із завдань сучасної інженерії поверхні є забезпечення параметрів міцності та довговічності поверхневих шарів деталей суднових технічних засобів, а у випадку втрати ними геометричних характеристик в результаті зношування, відновлення їх профілю з одночасним забезпеченням новосформованих областей поверхні необхідним комплексом експлуатаційних властивостей [2].

З розвитком технологій нанесення покриттів методами газотермічного напилення (ГТН) та через складність фізико-хімічних процесів, що відбуваються при ГТН для забезпечення експлуатаційних властивостей відновлюваної поверхні, потрібно встановити функціональний зв'язок між технологічними факторами, що впливають на формування покриття.

Дане дослідження зосереджено на визначенні функціональних взаємозв'язків процесів ГПН та їх

впливу на якість відновлюваної поверхні деталі та надійність суднових технічних засобів.

На умови формування ГПН-покриттів мають неадитивний вплив конструктивні особливості устаткування ГПН, параметри процесу напилення, характеристики матеріалу покриття [3]. Технологічні параметри процесу ГПН повинні забезпечувати задані властивості відновлюваних поверхонь деталей та надійність суднових технічних засобів.

Підвищення функціональних властивостей і терміну служби відновлених поверхонь деталей суднових технічних засобів вимагає рішення наукової задачі управління фізико-механічними процесами в поверхневих напилених шарах покриттів.

Дослідження взаємозв'язків між параметрами процесу ГПН та ступеня їх впливу на пористість, щільність, міцність зчеплення дозволять забезпечити необхідну мікротвердість та зносостійкість покриттів, а встановлені загальні закономірності між параметрами процесу відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту дозволяють керувати режимами процесу відновлення [4].

Тому дослідження функціональних взаємозв'язків процесу ГПН та їх впливу на механічні властивості системи «відновлена поверхня – покриття» є одним з найбільш важливих етапів при відновленні деталей суднових технічних засобів, який дозволяє об'єктивно оцінювати їх механічну поведінку при експлуатації,

управляти їх міцністю шляхом дії на склад, структуру, властивості і технологію отримання покриттів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанню забезпечення надійності деталей суднових технічних засобів шляхом керування технологічними параметрами процесу присвячені роботи [5, 6]. Автори публікацій [7, 8] зазначають, що при напиленні зовнішніх поверхонь тіл обертання не акцентується увага на вплив частоти обертання деталі на кут напилення порошків, а його невизначеність негативно впливає на адгезійні характеристики системи «покриття – основа».

У публікаціях [9, 10] автори зосереджують увагу на пористості покриттів та експериментально доводять її залежність від дистанції напилення та складу газової суміші. Дані робіт [11] доводять, що пористість покриттів 6-12% може забезпечувати достатню міцність, а збільшення її до 14 -20% може визвати зниження мікротвердості, зносостійкості та міцності зчеплення з основою. До речі спосіб ГПН не забезпечує високої міцності зчеплення [12], так як окремі частинки можуть бути не проплавлені або нагріті тільки до передплавильних температур, тому для підвищення адгезійних характеристик використовують додаткову підготовку поверхні деталі та термічну обробку після напилення.

Враховуючи вище викладене, авторами в роботі проведено експериментальні дослідження функціональних взаємозв'язків фізико-механічних процесів ГПН для визначення раціональних діапазонів процесу відновлення.

Мета статті

Визначення впливу функціональних взаємозв'язків фізико-механічних процесів ГПН з метою забезпечення надійності суднових технічних засобів в процесі ремонту.

Виклад основного матеріалу

Напилене покриття формується шляхом послідовного укладання великої кількості нагрітих до температури плавлення частинок, що супроводжується їхньою деформацією. Основними структурними елементами напиленого матеріалу є зерно, частка, шар (рис. 1).

На відміну від компактного матеріалу, що має два типи кордонів: між зернами та між фазами, напилене покриття має ще три типи кордонів (рис. 1), що надають істотний, а найчастіше визначальний вплив на властивості покриття. Це межі між деформованими частинками, міжшарові межі та межі, що розділяють покриття та підкладку [13].

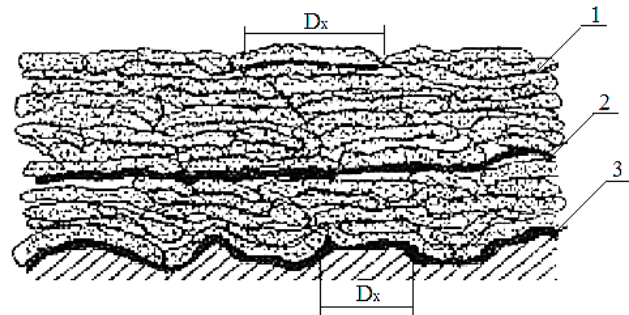


Рис. 1 – Схема структури покриттів: 1 – межа між покриттям та основою; 2 – міжшарова межа; 3 – межа між частинками; Dx – діаметр ділянки плями контакту, на якому відбувається «приварювання» частки

Як вже зазначалося, порошкові матеріали, що використовуються для ГПН, можна розділити на два класи: неоплавлювані та оплавлювані (такі, що самофлюсуються).

Виходячи з аналізу умов роботи швидкозношуваних поверхонь деталей суднових технічних засобів для їх відновлення і зміцнення необхідне використання порошків як сплавів, що самофлюсуються, так і тих, що застосовуються для «холодного напилення».

Для відновлення деталей типу «вал», що працюють при знакозмінних і ударних навантаженнях, абразивному зношуванні і при впливі високих температур, застосовують порошки, що самофлюсуються, ПГ-19М-01, ПГ-12Н-02, з подальшим оплавленням. Для відновлення та зміцнення посадкових місць деталей суднових технічних засобів, що не піддаються в процесі експлуатації ударним та знакозмінним навантаженням, застосовують порошкові матеріали без подальшого оплавлення ПГ-19М-01, ПГ-19Н-01 ПН85Ю15. Хімічний склад металевих порошкових матеріалів наведений в табл. 1 [14].

Таблиця 1

Хімічний склад металевих порошкових матеріалів

Марка порошку	Вміст хімічних елементів, %							
	Cu	Fe	Al	Ni	B	C	Si	Cr
ПГ-19М-01	основа	4,0	8,5 - 10,5	-	-	-	-	-
ПГ-12Н-02	-	3,0 - 5,0	-	основа	2,0 - 4,0	0,4 - 0,8	3,0 - 5,0	10 - 16
ПН85Ю15	-	-	13,5	основа	-	-	-	-

Вибір зазначених марок металевих порошків обумовлений тим, що вони є найбільш поширеними і характерними представниками матеріалів кожного класу, а саме: матеріалів, що самофлюсуються, інтерметалідів, сплавів на мідній основі. Крім того, ці порошки мають не однакові значення плинності через різну форму частинок. Механічні характеристики та властивості порошкових матеріалів наведені в табл. 2 [14]. При послідовному укладанні шарів неминуче утворюються порожнечі (особливо на стиках частинок). Ці порожнечі, чи пори, надають вирішального впливу на фізико-механічні властивості покриттів, і оцінка їх кількості необхідна під час виборів раціональних режимів нанесення захисних покриттів у кожному конкретному випадку.

Крім пористості, найважливішою характеристикою покриттів є величина їх міцності зчеплення з основним металом, яка буває часто основним критерієм при оцінці застосовності методів напilenня та матеріалів для відновлення-зміцнення ряду деталей, що працюють при складних навантаженнях. Пористість і адгезія залежать від технологічних параметрів

напilenня, витрати і тиску робочих газів, складу газової суміші, кількості порошкового матеріалу, що подається в одиницю часу в зону горіння, дистанції напilenня, швидкості обертання деталі.

Основний вплив на пористість покриттів надає дистанція напilenня, грануляція і матеріал порошку, що напильється. На рис. 2 представлена залежність загальної пористості покриттів, напильених порошками ПН85Ю15, ПГ-19М-01, ПГ-12Н-02 з розміром частинок 50...63 мкм.

Максимальна щільність покриттів досягається на дистанції, що відповідає максимальній температурі частинок та швидкості їх польоту.

Більш висока пористість покриттів з порошку ПН85Ю15 обумовлена вищою температурою плавлення в порівнянні з бронзою і сплавами, що самофлюсуються.

Зі збільшенням товщини покриття загальна пористість практично не змінюється, а спостерігається нелінійне зменшення відкритої пористості (рис. 3), що підтверджується дослідженнями проникності покриттів (рис. 4).

Таблиця 2

Механічні характеристики та властивості обраних порошкових матеріалів

Марка порошку	Грануляція, мкм	Твердість, HRC	Властивості напильених покриттів
ПГ-19М-01	40 - 80	65 - 72	Бронза БРАЖ9-4. Антифрикційне, корозійно-стійке покриття
ПГ-12Н-02	20 - 40	45 - 50	Оплавлений шар має високу зносостійкість і стійкість проти корозії. Стійке до термічних ударів.
ПН85Ю15	30 - 60	30 - 35	Жаростійке, зносостійке, антифрикційне покриття, стійке до термоциклювання, луку

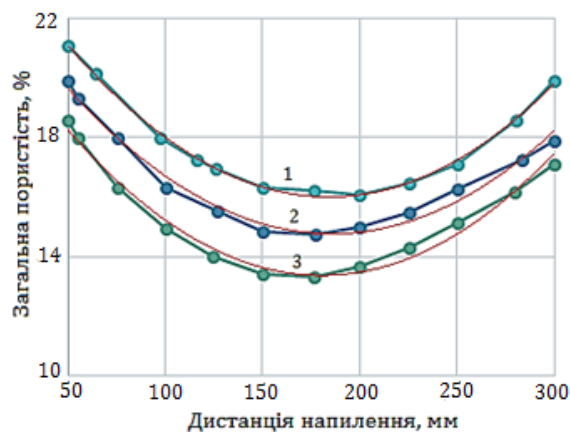


Рис. 2 – Вплив дистанції напilenня на загальну пористість покриттів, напильених порошками:

1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ-12Н-02; 3 – ПГ-19М-01
($\delta = 0,7 \dots 1,0$ мм, $d_0 = 50 \dots 63$ мкм)

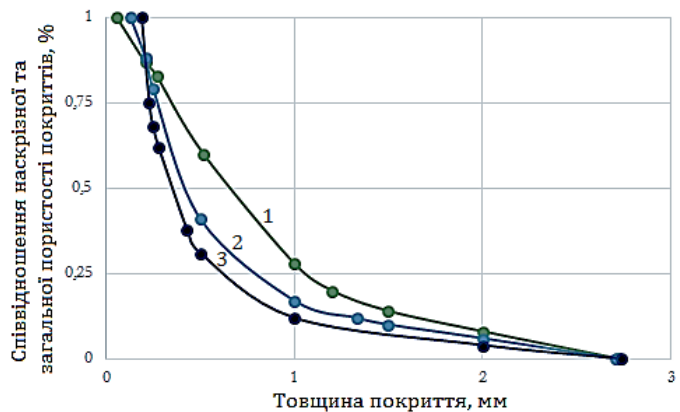


Рис. 3 – Вплив товщини покриттів на співвідношення наскрізної та загальної пористості покриттів, напильених з дистанції

$L = 180$ мм: 1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ-12Н-02; 3 – ПГ-19М-01
($\delta = 0,7 \dots 1,0$ мм, $d_0 = 50 \dots 63$ мкм)

Порівняння виду перехідної зони біля покриттів системи Ni-Al, Ni-Cr-B-Si та бронзи також свідчить про більш високу міцність зчеплення у алюмінідів нікелю. Невеликі області, в яких відсутня лінія розподілу покриття та основи, свідчить про перебіг дифузійних процесів, відсутність великої кількості вторинних оксидів на поверхні підкладки.

Результати визначення складу порошку до та після наплення показали, що втрати алюмінію становлять 10-15 мас.% від вихідного. Більшість його (4-7%) у вигляді Al_2O_3 у складі покриття, деяка частина (до 5%) утворює високодисперсні оксиди, мають мікротвердість 9×10^3 МПа.

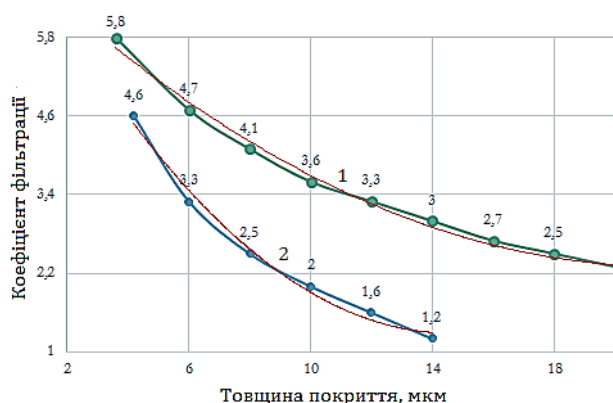


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта фільтрації від товщини покриттів, наплених порошками: 1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ-19М-01

Покриття мають максимальні значення міцності зчеплення при дистанції наплення, що забезпечує максимальну щільність (рис. 5). Слід зазначити той факт, що покриття з екзотермічно реагуючого порошку за наявності більшої, ніж у покриттів з інших матеріалів, пористості має більш високу міцність зчеплення з основою.

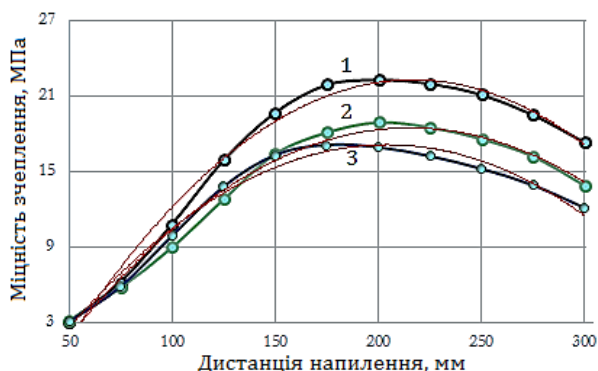


Рис. 5 – Залежність міцності зчеплення з основою від дистанції наплення: 1-ПН85Ю15; 2 – ПГ-19М-01; 3 – ПГ-12Н-02 ($\delta = 0,7 \dots 1,0$ мм; $d_0 = 50 \dots 63$ мкм)

Триботехнічні випробування, проведені в умовах обмеженої подачі мастила, показали, що після закінчення процесу приробітку збільшення питомого навантаження від 0,5 до 8 МПа призводить до зниження коефіцієнта тертя для всіх покриттів, що випробовуються (рис. 6).

У межах значень $P = 7-15$ МПа настає процес нормального механохімічного зношування, коли збільшення тиску не призводить до суттєвої зміни коефіцієнта тертя. У цьому дещо зменшується підвищення температури (крива 3, рис. 6).

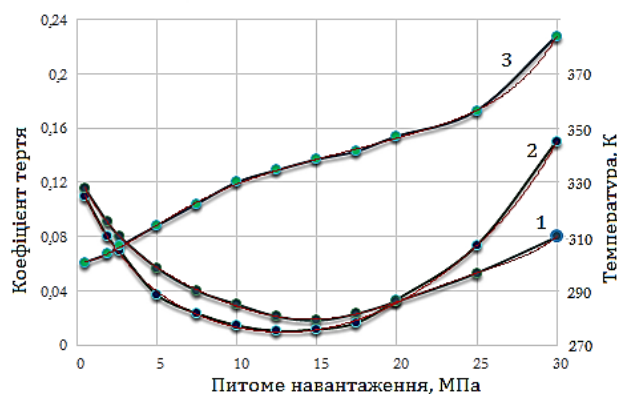


Рис. 6 – Вплив питомого навантаження на коефіцієнт тертя (1,2) та температуру (3) покриттів, наплених порошками: 1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ-19М-01; 3 – ПГ-12Н-02 ($V = 1,05$ м/с; $P \sim 20\%$)

Зі збільшенням значень питомого навантаження понад 16 МПа коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування (рис. 7) різко зростають.

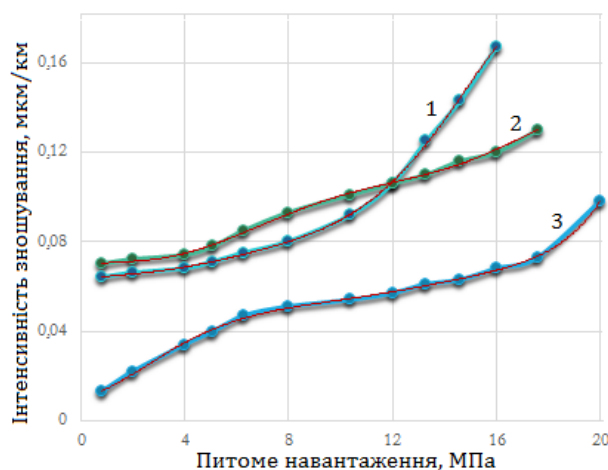


Рис. 7 – Залежність інтенсивності зношування від питомого навантаження при терті покриттів, наплених порошками: 1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ-19М-01; 3 – ПГ-12Н-02

На підставі цих даних і результатів дослідження залежності граничного тиску до скоплювання від швидкості ковзання (рис. 8) можна рекомендувати використання порошкових матеріалів для відновлення деталей вузлів тертя ковзання.

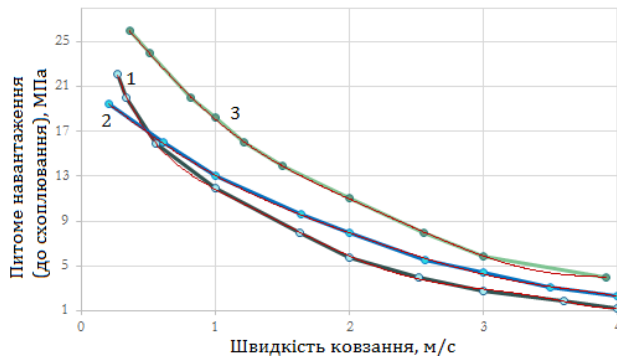


Рис. 8 – Вплив швидкості ковзання на величину граничного питомого навантаження (до скоплювання):
1 – ПН85Ю15; 2 – ПГ19М-01; 3 – ПГ12Н-02

Висновки

Дослідження впливу дистанції напилення на пористість та міцність зчеплення покриттів з основою показало, що оптимальною дистанцією напилення є відстань 150-180 мм, а висока пористість покриттів з порошку ПН85Ю15 обумовлена вищою температурою плавлення в порівнянні з бронзою і сплавами, що самофлюсуються. Зі збільшенням товщини покриття загальна пористість практично не змінюється, а спостерігається нелінійне зменшення відкритої пористості. Порівняння виду перехідної зони біля покриттів системи Ni-Al, Ni-Cr-B-Si та бронзи також свідчить про більш високу міцність зчеплення у алюмінідів нікелю.

Триботехнічні випробування, проведені в умовах обмеженої подачі мастила, показали, що після закінчення процесу приборітку збільшення питомого навантаження від 0,5 до 8 МПа призводить до зниження коефіцієнта тертя для всіх покриттів. У межах значень $P = 7-15$ МПа настає процес нормального механо-хімічного зношування, коли збільшення тиску не призводить до суттєвої зміни коефіцієнта тертя.

Перелік використаних джерел

- [1] Ahieiev M.S, Ustintcev S.M. Prerequisites the formation of a logistics system for the repair of parts of the «shaft» type of ship technical facilities. *Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union*: Proceedings of the International scientific conference, Wloclawek, the Republic of Poland, 6-7 September 2023. Pp. 68-71. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-340-8-16>.
- [2] Crawmer D.E. Coating structures, properties, and materials. *Handbook of thermal spray technology* / ed. by R.C. Tucker, Jr. 2013. Pp. 60-64. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05a.a0005755>.
- [3] Агєєв М.С., Манжелей В.С., Дзигар А.К. Нанесення захисних покриттів для підвищення зносостійкості та ресурсу при ремонті валів суднових СДВЗ. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 11-ї Міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 08-10 вересня 2020 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2020. С. 236-239.
- [4] Агєєв М.С., Устінцев С.М. Управління технологією відновлення поверхонь деталей засобів транспорту в процесі ремонту. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 13-ї Міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 07-09 вересня 2022 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2022. С. 169-173.
- [5] Improving the Operational Output of Marine Vessel Main Engine System through Cost Reduction using Reliability Technique / U.U. Kelechi et al. *International Journal of Engineering and Modern Technology*. 2022. Vol. 8, no. 2. Pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.56201/ijemt.v8.no2.2022.pg36.52>.
- [6] Influence of coating thickness on residual stress and adhesion-strength of cold-sprayed Inconel 718 coatings / R. Singh et al. *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 350. Pp. 64-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.080>.
- [7] Ageev M.S, Lopata L., Smirnova T. Of combined electric arc coatings. *International Scientific Journal Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24, №3/93. Pp. 51-61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>.
- [8] Агєєв М.С, Устінцев С.М. Особливості формування газотермічних покриттів у разі відновлення робочих поверхонь деталей суднових технічних засобів. *Розвиток транспорту*. 2023, № 3(18). С. 76-84. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.06>.
- [9] The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means / V. Ma-teichyk et al. *TRANSCOM 2023: Proceedings of the 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, Transportation Research Procedia* 74, Mikulov, Czech Republic, 29-31 May 2023. Pp. 592-599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.186>.
- [10] Packham D.E. Theories of Fundamental Adhesion. *Handbook of Adhesion Technology* / ed. by L.F.M. da Silva, A. Öchsner, R.D. Adams. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. Pp. 9-38. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-01169-6_2.
- [11] Дерябкіна Е. Дослідження впливу способу нанесення покриттів на якість відновлених деталей засобів транспорту. *Машинобудування*. 2019. № 23. С. 100-106. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2019-23-100-106>.

- [12] Нанесення покриття: Навч. посібник // В.М. Корж та ін. / за ред. К.А. Ющенко. К. : Арістей, 2005. 204 с.
- [13] Howes C.P. Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. *Well. J.* 1994. Vol. 73, № 4. Pp. 47-51.
- [14] Композиційні та наплавочні матеріали. URL: <https://metallsplav.com.ua/ua/g9432901-kompozitsionnye-naplavochnye-materialy> (дата звернення: 17.03.2025).

ENSURING THE RELIABILITY OF VESSEL EQUIPMENT DURING THE RESTORATION OF PARTS BY GAS FLAME SPRAYING

Ahieiev M.S.

D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5691-8986>, e-mail: maxageev73-73@ukr.net

When restoring worn surfaces of ship technical equipment parts by gas flame spraying (GFS), the quality of the restoration coating is affected by various technological factors, such as the spraying distance, spray angle, composition of the gas mixture and design features – coating thickness, porosity, which subsequently determine the quality of the coating, the service life of the restored parts and the reliability of the entire mechanism [1]. Studies of the performance of the «coating – base» system have shown that the main reason for their destruction is insufficient contact between the coating material and the restored surface. In other words, one of the most important operational characteristics of parts with GFS coatings is the adhesion strength of the coating to the restored surface – a criterion used in the practice of restoring parts during the repair process. The adhesion characteristics of the coating determine its performance. Therefore, the work experimentally established the influence of technological parameters of GFS on the performance of restored surfaces and their functional connection. The work considers the possibility of obtaining GFS - surfaces that are self-lubricating through the use of anaerobic sealant as a separate issue. The purpose of the article is to establish the influence of technological parameters of the GFS process on the quality of the restoration coating, which determines its performance and reliability of ship technical equipment as a whole. As a result of the study, the mechanism of influence of technological parameters (spraying distance, material, composition of the gas mixture, etc.) and design features (coating thickness, porosity) of the GFS process on the quality of the resulting coating was clarified. Taking into account the influence of technological parameters of the GFS process and their functional relationship on the quality of the resulting coating makes it possible to control the spraying process and obtain coatings with pre-set properties. The dependence of the total porosity and adhesion strength of GFS coatings on the spraying distance, the influence of the thickness of the coatings on the ratio of the through and total porosity of the coatings, has been established.

Keywords: GFS-coating, technological parameters, ship technical means, performance, reliability, adhesion strength.

References

- [1] M.S. Ahieiev, and S.M. Ustintsev, «Prerequisites the formation of a logistics system for the repair of parts of the «shaft» type of ship technical facilities», in Proc. of the Int. sci. conf. «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union», Wloclawek, the Republic of Poland, 2023, pp. 68-71. **doi: 10.30525/978-9934-26-340-8-16.**
- [2] D.E. Crawmer, «Coating structures, properties, and materials», in *Handbook of thermal spray technology*, R.C. Tucker, Jr., Ed., 2013, pp. 60-64. **doi: 10.31399/asm.hb.v05a.a0005755.**
- [3] M.S. Ahieiev, V.S. Manzheley, and A.K. Dzygar, «Nanesennia zakhysnykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti ta resursu pry remonti valiv sudnovykh SDVZ» [«Application of protective coatings to increase wear resistance and resource during repair of ship SDVZ shafts»], in Proc. of the 11-th Int. Sci. and Pract. Conf. «Modern power plants on transport and technologies and equipment for their maintenance», Kherson, Ukraine, 2020, pp. 236-239. (Ukr.)
- [4] M.S. Ahieiev, and S.M. Ustintsev, «Upravlinnia tekhnolohiieiu vidnovlennia poverkhon detalei zasobiv transportu v protsesi remontu» [Management of the technology of restoration of surfaces of transport parts during the repair process], in Proc. of the 13-th Int. Sci. and Pract. Conf. «Modern power plants on transport and technologies and equipment for their maintenance», Kherson, Ukraine, 2022, pp. 169-173. (Ukr.)
- [5] U.U. Kelechi, E.I. Okwu, N. Barinyima, and O.K. Wofuru-Nyenke, «Improving the Operational Output of Marine Vessel Main Engine System through Cost Reduction using Reliability Technique», *International Journal of Engineering and Modern Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 36-52, 2022. **doi: 10.56201/ijemt.v8.no2.2022.pg36.52.**
- [6] R. Singh, S. Schrufer, S. Wilson, J. Gibmeier, and R. Vassen, «Influence of coating thickness on residual stress and adhesion-strength of cold-sprayed Inconel 718 coatings», *Surface and Coatings Technology*,

- vol. 350, pp. 64-73, 2018. doi: 10.1016/j.surf-coat.2018.06.080.
- [7] M.S. Ageev, L. Lopata, and T. Smirnova, «Of combined electric arc coatings», *International Scientific Journal Problems of Tribology*, vol. 24, № 3/93, pp. 51-61, 2019. doi: 10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61.
- [8] M.S. Ahieiev, and S.M. Ustintsev, «Osoblyvosti formuvannia hazotermichnykh pokryttiv u razi vidnovlennia robochykh poverkhon detalei sudnovykh tekhnichnykh zasobiv» [«Peculiarities of the formation of gas-thermal coatings in the case of restoration of the working surfaces of parts of ship's technical equipment»], *Rozvytok transportu – Transport Development*, no. 3(18), pp. 76-84, 2023. doi: 10.33082/td.2023.3-18.06. (Ukr.)
- [9] V. Mateichyk, M. Ahieiev, J. Mościszewski, S. Ustincev, M. Volodarets, and S. Kovbasenko, «The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means», in Proc. of the 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia 74, Mikulov, Czech Republic, 2023, pp. 592-599. doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.186.
- [10] D.E. Packham, «Theories of Fundamental Adhesion», in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, R.D. Adams, Eds., Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 9-38. doi: 10.1007/978-3-642-01169-6_2.
- [11] E. Deryabkina, «Doslidzhennia vplyvu sposobu nanesennia pokryttiv na yakist vidnovlennykh detalei zasobiv transportu» [«Research on the influence of the method of coating application on the quality of restored parts of vehicles»], *Mashynobuduvannia – Mechanical Engineering*, no. 23, pp. 100-106, 2019. doi: 10.32820/2079-1747-2019-23-100-106. (Ukr.)
- [12] V.M. Korzh, *Nanesennia pokryttia: Navch. posibnyk* [Coating application: Textbook], V.M. Korzh, V.D. Kuznetsov, Y.S. Borisov, K.A. Yushchenko, Eds. Kyiv, Ukraine: Aristey Publ., 2005. (Ukr.)
- [13] C.P. Howes, «Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications», *Well. J.*, vol. 73, № 4, pp. 47-51, 1994.
- [14] Kompozytsiini ta naplavochni materialy (Composite and surfacing materials). [Online]. Available: <https://metallsplav.com.ua/ua/g9432901-kompozitsionnye-naplavochnye-materialy>. Accessed on: March 17, 2025.
- Стаття надійшла 03.04.2025
Стаття прийнята 28.04.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Агєєв М.С. Забезпечення надійності суднових технічних засобів при відновленні деталей газополум'яневим напиленням. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 247-253. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336421>.

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Гончарук І.П.

канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-4206>, e-mail: h.onmu@ukr.net

В умовах глобального потепління та активізації кліматичної політики питання енергетичної та екологічної безпеки водного транспорту набуває особливої актуальності. Міжнародна морська організація встановила амбітну мету – досягнення нульових чистих викидів парникових газів до 2050 року, що вимагає кардинального переосмислення підходів до енерговикористання на морських судах. У зв'язку з цим впровадження інноваційних технологій утилізації відпрацьованого тепла розглядається як ключовий інструмент підвищення енергоефективності суден та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. У статті подано систематизований аналіз сучасних інженерних рішень з утилізації теплоти, яка втрачається в процесі експлуатації судових енергетичних установок. Розглянуто принципи роботи та ефективність таких технологій, як органічний цикл Ренкіна (ORC), цикл Каліни, турбокомпаундні системи, а також термоелектричні генератори. Проаналізовано технічні параметри, енергетичну продуктивність, екологічні переваги та економічну доцільність впровадження в умовах реального судноплавства. Результати дослідження показують, що впровадження технологій утилізації відпрацьованого тепла дає змогу досягти економії палива на рівні 3-7% і суттєво знизити викиди CO₂, NO_x, SO_x. Найбільш ефективними виявилися системи ORC, які мають високу адаптивність до різних температурних джерел тепла на борту судна. Водночас технології турбокомпаундування, зокрема у поєднанні з паровими інжекційними модулями, продемонстрували перспективність за умов модернізації дизельних двигунів великої потужності. Досліджено також ризики, пов'язані з безпекою, просторовими обмеженнями на борту та особливостями обслуговування систем. На основі огляду наукової літератури, міжнародних стандартів та результатів моделювання, у роботі визначено ключові критерії вибору технологій утилізації відпрацьованого тепла для конкретних типів суден і сценаріїв експлуатації. Сформульовано рекомендації щодо проектування енергоефективних енергетичних систем суден та обґрунтовано необхідність розвитку гібридних систем, що поєднують переваги ORC, циклу Каліни та новітніх термоелектричних рішень. Узагальнено перспективи подальших досліджень і розглянуто можливості інтеграції технологій утилізації відпрацьованого тепла у стратегічне планування енергетичної модернізації флоту на шляху до декарбонізації морського транспорту.

Ключові слова: енергетична безпека, екологічна безпека, енергетична ефективність, утилізація відпрацьованого тепла, морський транспорт, органічний цикл Ренкіна, турбокомпаундна система, цикл Каліни.

Постановка проблеми

Сучасне морське судноплавство перебуває на перехресті технологічних, екологічних та нормативних викликів. На тлі зростаючих вимог Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зниження викидів парникових газів і покращення енергоефективності суден, впровадження інноваційних технологій стало ключовим інструментом забезпечення енергетичної та екологічної безпеки морського транспорту. За результатами третього дослідження ІМО щодо парникових газів, морські судна відповідальні приблизно за 2,8% глобальних викидів парникових газів, водночас генеруючи значні обсяги втраченої теплоти внаслідок низької ефективності двигунів внутрішнього згорання.

Метою цієї оглядової статті є систематизація сучасних технічних рішень і технологій, спрямованих на підвищення рівня енергетичної та екологічної безпеки суден. У статті розглядаються технічні характеристики, ефективність та практична доцільність впровадження різних систем з урахуванням специфіки морської експлуатації. Особливу увагу приділено відповідності сучасних технологій вимогам нормативної бази ІМО, потенціалу зменшення викидів CO₂, SO_x і NO_x, підвищенню енергоефективності суден, а також забезпеченню відповідності довгостроковим цілям у межах

декарбонізації міжнародного судноплавства. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати нормативно-правові вимоги Міжнародної морської організації щодо скорочення викидів парникових газів та підвищення енергоефективності морського транспорту;
- описати та класифікувати сучасні технології систем утилізації відпрацьованого тепла (СУВТ), зокрема на основі органічного циклу Ренкіна (ОЦР), циклу Каліни, турбокомпаундних систем тощо;
- розглянути практичні приклади впровадження систем енергозбереження на судах, включаючи результати експериментальних або симуляційних досліджень;
- оцінити переваги та обмеження основних технологічних рішень, зокрема з погляду паливної економічності, зменшення викидів CO₂, NO_x, SO_x, а також експлуатаційної надійності;
- визначити фактори, що впливають на вибір оптимальної технології з урахуванням типу судна, умов експлуатації, економічної доцільності та безпеки;
- узагальнити тенденції та перспективи розвитку систем підвищення енергетичної та екологічної безпеки суден, враховуючи вимоги щодо декарбонізації морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У відповідь на загрозу зміни клімату ІМО затвердила оновлену Стратегію зі скорочення викидів парникових газів із суден 2023 року (резолюція МЕРС.377(80)), яка передбачає досягнення нульових чистих викидів до або близько 2050 року, а також встановлює проміжні цілі: скорочення викидів на 20-30% до 2030 року та на 70-80% до 2040 року (відносно рівня 2008 року). Паралельно, з 2023 року набули чинності технічні та експлуатаційні заходи, зокрема Індекс енергоефективності для існуючих суден (ЕЕХІ) та Індикатор інтенсивності викидів вуглецю (СІІ) (МЕРС.328(76)), а також оновлені керівні принципи з Плану управління енергоефективністю судна (SEEMP) (МЕРС.401(83)).

Одним із перспективних напрямів зменшення споживання палива й пов'язаних із ним викидів є впровадження систем утилізації відпрацьованого тепла. Такі системи дозволяють перетворювати теплову енергію, втрачану з вихлопними газами, охолоджувальною водою та іншими потоками, на корисну електричну або механічну енергію без додаткового споживання палива. Серед основних технологій – цикли Ренкіна (у тому числі органічні та надкритичні), цикл Каліни, термоелектричні генератори [1], а також турбокомпаундні системи, які реалізуються як у вигляді автономних рішень [2], так і в комбінованих конфігураціях [3].

Таким чином, стаття пропонує комплексний огляд сучасних технологій утилізації відпрацьованого тепла як одного з ключових інструментів підвищення енергоефективності та екологічної безпеки морських суден у контексті виконання вимог ІМО. На основі аналізу наявних технічних рішень, зокрема органічного циклу Ренкіна, циклу Каліни, турбокомпаундних систем і термоелектричних генераторів, у роботі розглядаються їхні переваги, обмеження, умови ефективного впровадження, а також відповідність новим регуляторним нормам. Особливу увагу приділено оцінці енергетичного потенціалу різних джерел тепла на борту судна, аналізу конструктивної сумісності технологій із судовими енергетичними системами, а також економічній доцільності їх застосування. Представлений матеріал може бути використаний як методична основа для подальших досліджень, техніко-економічного обґрунтування рішень у суднобудуванні та розробки інноваційних стратегій модернізації флоту відповідно до цілей декарбонізації морського транспорту.

Мета статті

Мета статті – аналіз і систематизація сучасних технологій утилізації відпрацьованого тепла з метою підвищення енергетичної та екологічної безпеки суден відповідно до вимог декарбонізації морського транспорту.

Виклад основного матеріалу

Щоб задовольнити потреби в електроенергії для роботи, а також з огляду на їхню мобільність та розташування, більшість суден мають спеціальну бортову електростанцію, що зазвичай використовує дизельні двигуни, парові турбіни та газові турбіни. Ці системи спалюють викопне паливо для перетворення теплової енергії згоряння в механічну енергію, яка далі перетворюється в інші форми відповідно до потреб. Побічні продукти згоряння палива є основним джерелом викидів і, як наслідок, більшість судових викидів збільшуються паралельно зі споживанням палива. Тому, щоб зменшити викиди, необхідно зменшити споживання палива від поточного рівня. Як один з варіантів досягнення цієї мети є шляхи покращення загальної ефективності силової установки.

Дизельний двигун на сьогоднішній день є найпоширенішим варіантом для виробництва енергії на широкому спектрі типів суден. З точки зору максимальної встановленої потужності всіх цивільних суден водотоннажністю понад 100 брутто-реєстрових тонн, 96% цієї енергії виробляється дизельними установками. Через відсутність альтернативних силових установок з аналогічною питомою потужністю, вартістю і паливною ефективністю, очікується, що дизельні двигуни не будуть замінені в осяжному періоді часу [4]. Сучасні великі дизельні двигуни ефективно використовують паливо приблизно на 50%, а решта теплової енергії палива втрачається в навколишнє середовище у вигляді відпрацьованого тепла [5]. Ефективна утилізація відпрацьованої теплової енергії може підвищити ефективність роботи станції та зменшити викиди, використовуючи спеціальні системи утилізації відпрацьованого тепла для виробництва електроенергії або використовуючи її для опалення. Для звичайного судна навантаження на опалення є незначним порівняно з наявним відпрацьованим теплом, що призводить до того, що значна частина теплової енергії залишається невикористаною. Допоміжна енергетична установка може утилізувати решту відпрацьованого тепла для виробництва механічної або електричної енергії, яка потім може подаватися на потреби судової енергосистеми, яка потім може задовольнити попит на силову установку та допоміжні послуги без додаткових витрат на паливо і з нульовим рівнем викидів CO₂. Компанія «MAN Diesel» [6] бачить можливість для досягнення загальної ефективності 60% для утилізованої енергії палива на бортовому дизелі, в той час як Baldi і Gabrielli [7] прогнозують, виходячи з ексергетичного аналізу, досяжна економія палива становить 4-16% для танкерів середньої дальності за рахунок використання СУВТ.

У представленому дослідженні проаналізовано найефективніші технології утилізації відпрацьованого тепла для морських застосувань, серед яких:

- цикл Ранкіна – традиційне рішення для середньотемпературних джерел тепла (вище 350°C), здатне підвищити ККД енергетичної установки на 2-4%;

- органічний цикл Ранкіна – ефективний при температурах 100–300°C, завдяки використанню органічних робочих тіл, забезпечує приріст ККД до 10%;

- суперкритичний цикл Ранкіна – дозволяє досягти ще більшого ефекту за рахунок зменшення втрат енергії при перетворенні теплоти в роботу;

- цикл Каліни – найбільш ефективне рішення для утилізації низькотемпературних джерел (нижче 200°C), з потенціалом підвищення ККД до 15%;

- турбокомпаундні системи – використовують енергію вихлопних газів, підвищуючи продуктивність двигуна без збільшення витрат пального;

- термоелектричні генератори – перспективна технологія з прямим перетворенням тепла в електрику, що не має рухомих частин і придатна для застосування в умовах обмеженого простору.

Методологія цього огляду ґрунтується на контент-аналізі наукової літератури, що стосується застосування органічного циклу Ренкіна та турбокомпаундних систем як систем утилізації відпрацьованого тепла на морських судах. Для досягнення мети дослідження було здійснено систематизований аналіз публікацій, що охоплюють техніко-економічні, енергетичні та екологічні аспекти впровадження таких систем у морській енергетиці.

Пошук релевантної літератури здійснювався у наукових базах даних Scopus, Web of Science, Elsevier ScienceDirect, Taylor & Francis, SpringerLink та інших відкритих джерелах. Пошук за ключовими словами: «відпрацьоване тепло» або «теплова енергія», або «рекуперація тепла», або «рекуперація енергії»; «корабель» або «судно», або «морський», або «човен»; «двигун» або «мотор», або «рушій», або «енергетична установка»; «ефективність» або «продуктивність», або «оптимізація», або «утилізація»; «система» або «технологія», або «метод», або «процес». До аналізу включались лише ті дослідження, які відповідали таким критеріям: публікація у рецензованих наукових журналах; наявність технічного або термодинамічного моделювання ОЦР або турбокомпаундної системи для судових дизельних двигунів; оцінка енергоефективності, викидів або паливної економічності; обґрунтування вибору робочих тіл або конфігурації циклу; аналіз практичної придатності до судових умов експлуатації.

Було відібрано понад 20 ключових джерел, з яких 6 присвячені моделюванню ОЦР-систем [8-13], а інші розкривають технічну реалізацію та ефективність турбокомпаундування, зокрема із впорскуванням пари [14, 15]. Також було враховано праці, що аналізують комбіновані цикли [16] та системи з використанням енергії хвиль і відновлюваних джерел [17].

Кожне дослідження було проаналізоване з точки зору:

- потенціалу зниження витрати палива;
- величини підвищення загальної термічної ефективності;
- зменшення викидів CO₂ та інших шкідливих речовин;
- рівня складності впровадження на судах (нове будівництво або модернізація);
- економічної доцільності (період окупності).

На рисунку 1 представлено тематичну мапу, згенеровану на основі наукової аналітики бази даних Scopus, яка відображає основні напрями досліджень, пов'язаних із технологіями утилізації відпрацьованого тепла в морських двигунах (Технологія утилізації відпрацьованого тепла) в судових двигунах. Дана структура візуалізує міждисциплінарну взаємодію чотирьох ключових доменів: практичні приклади впровадження (Кейс-стаді), підвищення ефективності (Підвищення ефективності), екологічні аспекти (Вплив на навколишнє середовище) та технологічні рішення (Технології). У межах кожного з напрямів відокремлені найбільш актуальні під тематики. Зокрема: (Чиста вихідна потужність) і (Техніко-економічне обґрунтування) ілюструють прикладні дослідження ефективності реальних систем; (Ексергетична ефективність) та (Використання енергії) стосуються оцінки використання енергії з точки зору термодинаміки; (Скорочення викидів CO₂ – NO_x) і (Забруднення води) представляють вплив СУВТ на довкілля; (Термоелектричне обладнання) та (Органічний цикл Ренкіна) позначають провідні технічні рішення.

Для оцінки ефективності та практичної придатності ОЦР-систем також враховувались типові джерела тепла на судах: вихлопні гази, система охолодження, маслоохолоджувачі та повітря з ресивера наддуву. Застосовувалися порівняльні підходи до оцінки ОЦР проти традиційних парових циклів у різних температурних діапазонах. Особливу увагу було приділено питанням безпеки (займистість робочих тіл), просторовим обмеженням судових енергетичних установок і відповідності сучасним вимогам ІМО щодо скорочення викидів (MARPOL Annex VI, резолюції МЕРС.328(76), МЕРС.377(80)).

Таким чином, отримані дані дозволяють сформулювати комплексне уявлення про технологічну ефективність, екологічні переваги та бар'єри впровадження ОЦР – і турбокомпаундних СУВТ як складових стратегії підвищення енергетичної та екологічної безпеки суден.

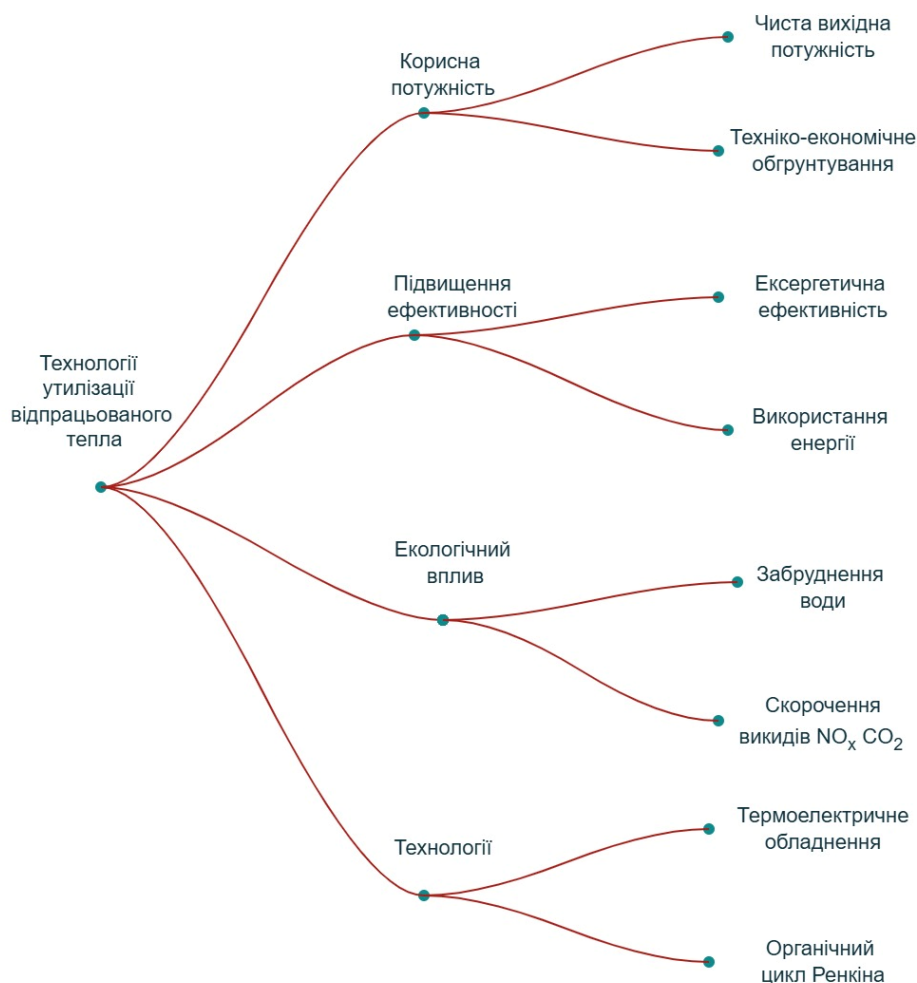


Рис. 1 – Семантична структура ключових напрямів досліджень у сфері утилізації відпрацьованого тепла в суднових енергетичних установках

Аналіз досліджень, присвячених застосуванню органічного циклу Ренкіна як системи утилізації відпрацьованого тепла на морських судах, показав наступне.

У дослідженні [18] розглядається робота ОЦР в умовах змінного навантаження морського дизельного двигуна. Автори демонструють, що впровадження ОЦР дозволяє підвищити загальну теплову ефективність на понад 6% і згенерувати електричну потужність, еквівалентну 4% механічної потужності двигуна. Перевагою є аналіз кількох джерел тепла – від вихлопних газів до охолоджуючої води. Однак стаття не містить глибокого аналізу економічної доцільності та не розглядає питання довготривалої надійності системи в умовах морської експлуатації. Автори у дослідженні [8] подають детальний термодинамічний аналіз ОЦР для суднових дизельних двигунів. Він демонструє ефективність роботи ОЦР у межах різних експлуатаційних режимів. Перевагою є глибоке моделювання й аналіз параметрів продуктивності. Недоліком є відсутність ексергетичного та економічного аналізу, а також

обмежений розгляд екологічних характеристик робочих рідин. У роботі [11] проведено порівняльне дослідження ефективності органічних рідин і води для циклу Ренкіна. Результати підтверджують перевагу ОЦР у використанні низькотемпературних джерел тепла. Автори дослідили теплову відповідність і екологічну безпеку різних робочих тіл. Проте, аналіз не включає дані з практичної реалізації системи на судні та не повністю враховує ризики токсичності й займистості органічних рідин. Стаття [9] вирізняється використанням розширеного ексергетичного аналізу ОЦР для морської електростанції. Ідентифіковано основні джерела втрат енергії в системі, що дозволяє пропонувати конкретні інженерні рішення щодо її оптимізації. Проте, робота є суто теоретичною, без експериментальної або техніко-економічної валідації результатів. У статті [16] авторами запропоновано комбіновану систему, що поєднує паровий цикл Ренкіна зі схемою ОЦР, що дозволяє ефективніше використовувати енергію різних температурних рівнів. Дослідження демонструє значне підвищення загальної ефективності системи утилізації.

Однак така система ускладнює конструкцію, потребує складного керування та не включає детальний аналіз надійності чи обслуговування. У дослідженні [10] виконано тепловий розрахунок ОЦР для великого нафтового танкера з використанням тепла головного двигуна та насосів для нафти. Представлена модель добре масштабована і демонструє придатність для великотоннажних суден. Однак не розглянуто інтеграцію системи з енергетичною архітектурою судна, а також є технічні обмеження, пов'язані з теплоізоляцією та розміщенням обладнання. У статті [11] представлено порівняльне дослідження ефективності органічних рідин і води як робочих тіл у циклі Ренкіна для утилізації відпрацьованого тепла на судах. Автори встановили, що ОЦР має кращу ефективність при низькотемпературних джерелах тепла, ніж традиційний паровий цикл. Також розглянуто екологічні аспекти застосування різних робочих рідин. Проте дослідження є переважно теоретичним, без апробації на реальних судових енергетичних установках. Обмежено розглянуто ризики, пов'язані з токсичністю і займистістю органічних рідин. У роботі [18] проведено термодинамічне моделювання ОЦР-системи при різних режимах роботи морського дизельного двигуна. Виявлено, що впровадження ОЦР дозволяє підвищити загальну теплову ефективність до 6% та зменшити викиди CO_2 приблизно на 6,9%. Дослідження охоплює використання кількох джерел тепла, включаючи вихлопні гази, сорочку охолодження та маслоохолоджувач. Проте відсутній докладний економічний аналіз, а також оцінка практичних аспектів інтеграції такої системи на судні. В огляді [19] авторами систематизовано результати понад 100 наукових праць, присвячених застосуванню ОЦР у морських умовах. Представлено типові архітектури систем, оцінено ефективність перетворення енергії, вибір робочих тіл і основні джерела тепла. Також розглянуто практичні приклади впровадження та демонстраційні проекти. Проте огляд не містить глибокого порівняльного аналізу з альтернативними циклами (наприклад, цикл Каліни) та не дає повної оцінки економічної доцільності в морських умовах. У статті [12] авторами проаналізовано транскритичну конфігурацію органічного циклу Ренкіна для утилізації тепла судового дизельного двигуна. Було проведено термoeкологічну оптимізацію параметрів циклу, що дозволило досягти більшої ефективності у порівнянні з традиційною ОЦР-системою. Автори акцентують увагу на екологічних перевагах, включаючи зниження шкідливих викидів. Водночас запропонована система має складну архітектуру та вимагає точного керування, що може ускладнити її інтеграцію в стандартні судові енергосистеми. У дослідженні [13] застосовано методи байєсівської оптимізації для вибору найефективніших робочих тіл для ОЦР-системи, з урахуванням параметрів конкретного судового двигуна. Результати показують, що такий підхід дозволяє підвищити ефективність та адаптивність системи до умов реальної експлуатації. Проте запропонована методика вимагає високого рівня

обчислювальної підтримки, а результати ще потребують валідації у вигляді практичного впровадження на судах.

Аналіз досліджень, присвячених турбокомпаундним системам як засобу утилізації відпрацьованого тепла на морських судах. У дослідженні [14] представлено енергетичний та ексергетичний аналіз нової пароінжекційної турбокомпаундної системи (Турбокомпресування з впорскуванням пари – ТВП), застосованої на двотактному судовому дизельному двигуні. Система дозволяє зменшити витрати палива на 5,1% у порівнянні з традиційним турбокомпаундуванням. Також виявлено, що поєднання впорскування пари з турбіною покращує відбір енергії з вихлопних газів. Однак у дослідженні не розглянуто аспекти інтеграції системи на реальному судні, а також не проаналізовано вплив змінних навантажень двигуна на стабільність роботи ТВП-системи. В роботі [15] авторами проведено порівняння термодинамічної ефективності та техніко-економічних характеристик пароінжекційної турбокомпаундної системи з традиційною паровою системою Ренкіна. ТВП-система виявилась більш ефективною при менших витратах інвестицій і коротшому періоді окупності (4,7 року), забезпечуючи економію палива до 5,2%. Проте дослідження не включає оцінки довготривалої надійності системи в реальних умовах морської експлуатації, а також не враховує обмежень простору та ваги на судні. У статті [17] розглянуто загальний підхід до утилізації відпрацьованого тепла головного судового двигуна. Описано потенційні джерела тепла та варіанти їх використання, зокрема через турбіну або допоміжні генератори. Автори підкреслюють можливість підвищення паливної економічності та зменшення шкідливих викидів. Проте робота є оглядовою і не містить кількісного аналізу чи математичного моделювання. Відсутні конкретні дані щодо конфігурації або ефективності турбокомпаундних систем у порівнянні з альтернативними технологіями. У дослідженні [20] виконано техніко-економічний і екологічний аналіз парових систем рекуперації тепла для суден далекого плавання з урахуванням реальних профілів експлуатації. Хоча основна увага приділена паровим системам, автори надають загальну оцінку ефективності різних типів утилізації, включаючи турбокомпаундування [21]. Перевагою є врахування змінних режимів судової роботи, що наближає результати до практичних умов. Однак дослідження не деталізує конкретні аспекти роботи турбокомпаундних систем і не проводить прямого порівняння між ТВП, ОЦР та іншими технологіями.

Турбокомпаундні системи, особливо модифіковані за технологією ТВП, мають значний потенціал зменшення витрат палива (до 5,2%) при порівняно невеликих інвестиційних витратах [22]. Водночас головними обмеженнями залишаються складність інтеграції, недослідженість довготривалої експлуатаційної надійності та недостатня кількість практичних кейсів у морській галузі [23].

Усі дослідження підтверджують перспективність використання ОЦР як системи утилізації відпрацьованого тепла для морських двигунів. Найбільш розвинені роботи містять або глибокий термодинамічний аналіз, або інноваційні конструктивні підходи [24]. Основні обмеження – це відсутність експериментальних даних, практичного аналізу інтеграції з судновими системами та економічної оцінки життєвого циклу.

Рисунок 2 ілюструє логічну структуру аналізу ефективності систем утилізації відпрацьованого тепла у морських енергетичних установках, охоплюючи як технічні, так і екологічні аспекти. У центрі моделі розміщено базову категорію – «Утилізація відпрацьованого тепла», яка розгалужується на три ключові напрямки:

1. Кейс-стаді – включає аналіз реальних прикладів впровадження з акцентом на генерування потужностей;

2. Підвищення ефективності – охоплює покращення енергетичних показників із фокусом на екологічний вплив;

3. Ексергетичний ККД – спрямований на оцінку використання енергії з точки зору ексергії.

Екологічний вплив виступає центральним інтегруючим елементом і має два піднапрями:

1. Забруднення водного середовища, що на пряму пов'язане з зменшенням викидів CO_2 і NO_x ;

2. Термоелектричне обладнання, як сучасне технологічне рішення, що включає органічний цикл Ренкіна як одну з найбільш перспективних технологій СУВТ.

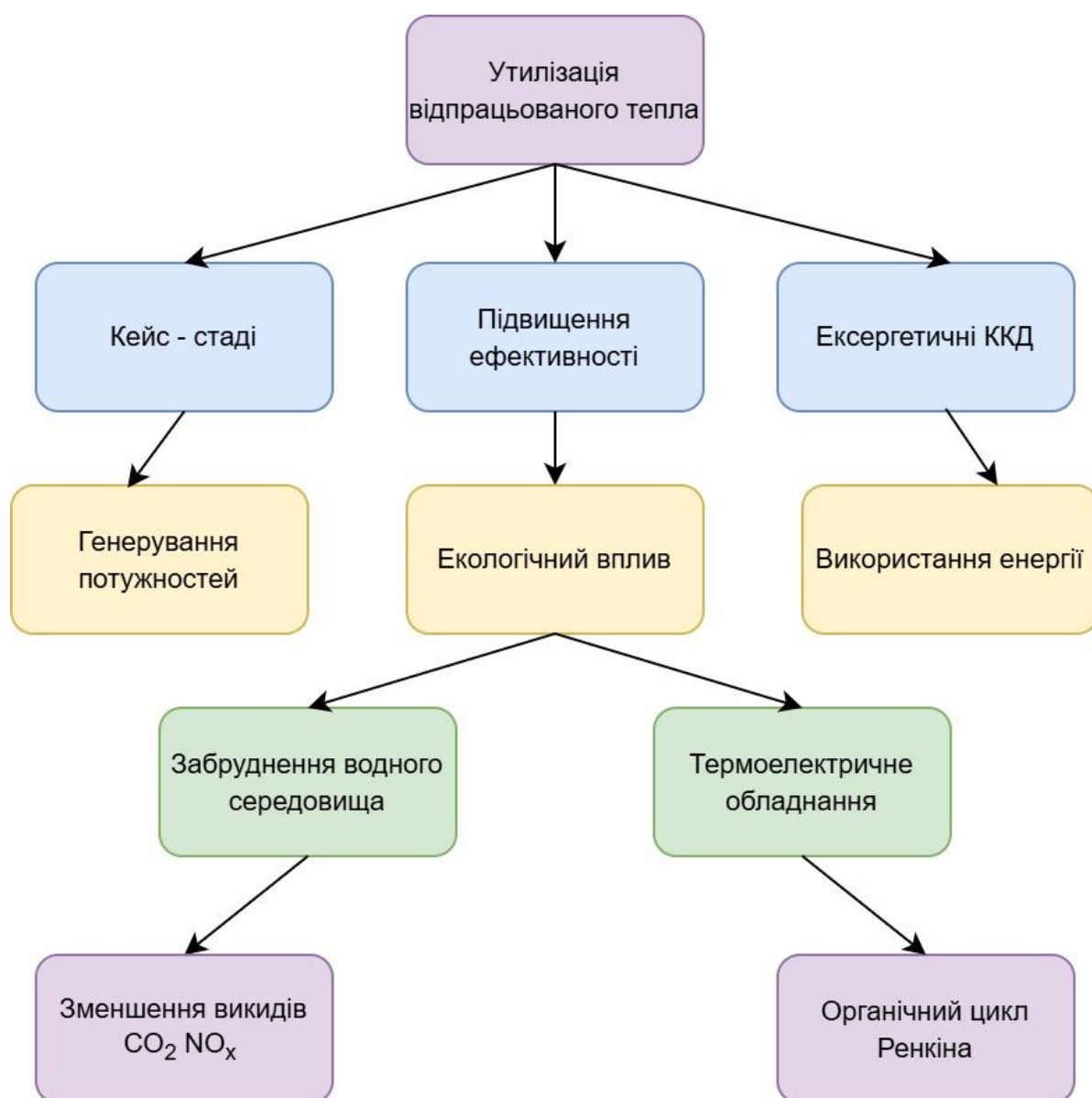


Рис. 2 – Концептуальна модель взаємозв'язку технічних і екологічних чинників у системах утилізації відпрацьованого тепла

Ця структура дозволяє візуально систематизувати взаємозв'язки між різними параметрами, що впливають на ефективність впровадження систем утилізації тепла, та є основою для прийняття інженерних рішень у рамках стратегії декарбонізації морського транспорту.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що міжнародна нормативна база, сформована ІМО, дедалі активніше спрямовується на досягнення цілей декарбонізації судноплавства. Зокрема, Стратегія ІМО 2023 року щодо скорочення викидів парникових газів передбачає досягнення нульових чистих викидів до 2050 року, що визначає вектор розвитку енергетичних технологій у морській галузі.

Класифікація та аналіз сучасних технологій СУВТ свідчать про високий потенціал систем на основі органічного циклу Ренкіна, циклу Каліни, а також турбокомпаундних систем. Ці рішення демонструють різну ефективність залежно від температурного діапазону джерел тепла, конструктивних особливостей судна та вимог до генерації енергії.

Розглянуті експериментальні й чисельні дослідження підтверджують, що впровадження СУВТ дозволяє досягти економії палива на рівні 3-7%, зменшити викиди CO₂, NO_x, SO_x, а також покращити загальну екологічну безпеку експлуатації суден. Найбільш вивченими та практично апробованими є ОЦР-системи, у той час як ТВП-модифікації турбокомпаундування потребують подальшої дослідної апробації.

Оптимальний вибір СУВТ залежить від таких факторів, як тип судна, характер маршруту, обсяг доступного тепла, економічна доцільність модернізації, просторові обмеження та вимоги до безпеки робочих тіл. Загальна тенденція свідчить про зростання уваги до гібридних та адаптивних рішень, здатних поєднувати ОЦР або цикл Каліни з іншими технологіями утилізації.

Таким чином, системи утилізації відпрацьованого тепла посідають провідне місце в реалізації стратегії підвищення енергетичної та екологічної безпеки флоту та становлять ключовий елемент декарбонізаційної трансформації морського транспорту.

Перелік використаних джерел

- [1] Features of optimization of maintenance plan for thermoelectric generators of marine propulsion systems / A. Golovan et al. *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology : Proceedings of the 15th International Conference TRANSBALTICA*, Vilnius, Lithuania, 19-20 September 2024. Pp. 26-35. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_3.
- [2] Golovan A., Gritsuk I., Honcharuk I. Reliable ship emergency power source: A Monte Carlo simulation approach to optimize remaining capacity measurement frequency for Lead-Acid battery maintenance. *SAE International Journal of Electrified Vehicles*. 2023. Vol. 13(2). DOI: <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>.
- [3] Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework / A. Golovan et al. *Computers*. 2024. Vol. 13(10). Article 261. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers13100261>.
- [4] Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050 / Eyring V., Köhler H.W., Lauer A., Lemper B. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2005. Vol. 110, iss. D17. Article D17306. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JD005620>.
- [5] Thermo efficiency system for reduction of fuel consumption and CO₂. MAN Diesel and Turbo, 2014.
- [6] MAN Diesel and Turbo. Exhaust gas emission control today and tomorrow application on MAN B&W two-stroke marine diesel engines. Copenhagen, Denmark : MAN Diesel, 2008.
- [7] Baldi F., Gabrielli C. A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. *Energy*. 2015. Vol. 80. Pp. 654-665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.020>.
- [8] Thermodynamic analysis of the organic rankine cycle as a waste heat recovery system of marine diesel engine / Jin J., Lee H., Park G., Choi J. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*. 2012. Vol. 36(7). Pp. 711-719. DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2012.36.7.711>.
- [9] Koroglu T. Advanced exergy analysis of an organic rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant. *Journal of Thermal Engineering*. 2017. Vol. 3(2). Pp. 1136-1148. DOI: <https://doi.org/10.18186/thermal.298614>.
- [10] Thermal design and analysis of an organic rankine cycle system utilizing the main engine and cargo oil pump turbine based waste heats in a large tanker ship / O. Konur et al. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 368. Article 133230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133230>.
- [11] De La Fuente S.S., Greig A.R. Making shipping greener: comparative study between organic fluids and water for Rankine cycle waste heat recovery. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2015. Vol. 14(2). Pp. 70-84. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2015.1077601>.
- [12] Akman M., Ergin S. Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine. *Ships and Offshore Structures*. 2020. Vol. 16(10). Pp. 1104-1113. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1816744>.
- [13] Parametric study of organic Rankine working fluids via Bayesian optimization of a preference learning ranking for a waste heat recovery system applied to a case study marine engine / L.A. Díaz-Secades et al. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 306. Article 118124.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118124>.

- [14] Energy and exergy analysis of a novel steam injected turbocompounding system applied on the marine two-stroke diesel engine / Zhu S., Ma Z., Zhang K., Deng K. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 221. Article 113207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113207>.
- [15] Thermodynamic and techno-economic comparisons of the steam injected turbocompounding system with conventional steam Rankine cycle systems in recovering waste heat from the marine two-stroke engine / Zhu S., Sun K., Bai S., Deng K. *Energy*. 2022. Vol. 245. Article 123245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123245>.
- [16] A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine / X. Liu et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 265. Article 121502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121502>.
- [17] Zhemin J., Yuxin Y. Analysis of waste heat utilization of ship main engine. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 165. Article 06027. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016506027>.
- [18] Akman M., Ergin S. An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2018. Vol. 233(2). Pp. 586-601. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475090218770947>.
- [19] Konur O., Colpan C.O., Saatcioglu O.Y. A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications. *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44(2). Pp. 4083-4122. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2072981>.
- [20] Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles / Theotokatos G., Rentizelas A., Guan C., Ancic I. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 267. Article 121837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121837>.
- [21] Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals / A. Golovan et al. *SAE Technical Papers*. 2018-01-1774. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>.
- [22] Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions / A. Golovan et al. *ICTE in Transportation and Logistics*. 2019. Pp. 295-301. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37.
- [23] Aspects of forming the information V2I model of the transport vessel / A. Golovan et al. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>.
- [24] Golovan A., Gritsuk I., Honcharuk I. Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 5. Pp. 77-84. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077>.

PERSPECTIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF WATER TRANSPORT MEANS

Honcharuk I.P.

PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-4206>, e-mail: h.onmu@ukr.net

In the context of global warming and the intensification of climate policy, the issue of energy and environmental safety of water transport is becoming particularly relevant. The International Maritime Organization has set an ambitious goal of achieving zero net greenhouse gas emissions by 2050, which requires a radical rethinking of approaches to energy use on ships. In this regard, the introduction of innovative waste heat utilization technologies is considered a key tool for improving the energy efficiency of ships and reducing the negative impact on the environment. The article presents a systematic analysis of modern engineering solutions for utilization of heat lost during the operation of ship power plants. The principles of operation and efficiency of such technologies as the organic Rankine cycle (ORC), the Kalina cycle, turbo-compound systems, and thermoelectric generators are considered. The technical parameters, energy productivity, environmental benefits and economic feasibility of implementation in real shipping conditions are analyzed. The results of the study show that the introduction of waste heat utilization technologies can achieve fuel savings of 3-7% and significantly reduce CO₂, NO_x, and SO_x emissions. ORC systems have proven to be the most effective, as they are highly adaptable to different temperature sources of heat on board. At the same time, turbo-compounding technologies, in particular in combination with steam injection modules, have shown promise in the modernization of high-power diesel engines. The risks associated with safety, space constraints on board, and system maintenance are also investigated. Based on a review of scientific literature, international standards, and modeling results, the paper identifies key criteria for selecting waste heat recovery technologies for specific types of ships and operating scenarios. Recommendations for the design of

energy-efficient ship energy systems are formulated and the need to develop hybrid systems that combine the advantages of ORC, the Kalina cycle, and the latest thermoelectric solutions is substantiated. The prospects for further research are summarized and the possibilities of integrating waste heat recovery technologies into the strategic planning of energy modernization of the fleet on the way to decarbonization of maritime transport are considered.

Keywords: energy security, environmental safety, energy efficiency, waste heat utilization, marine transport, WHRS systems, organic Rankine cycle, turbo-compound system, Kalina cycle.

References

- [1] A. Golovan, I. Gritsuk, I. Honcharuk, O. Volska, Y. Grytsuk, and V. Hritsuk, «Features of optimization of maintenance plan for thermoelectric generators of marine propulsion systems», in Proc. of the 15th Int. Conf. «TRANSBALTICA XV. Transportation Science and Technology, Vilnius, Lithuania, 2024, pp. 26-35. doi: 10.1007/978-3-031-85390-6_3.
- [2] A. Golovan, I. Gritsuk, and I. Honcharuk, «Reliable ship emergency power source: A Monte Carlo simulation approach to optimize remaining capacity measurement frequency for Lead-Acid battery maintenance», *SAE International Journal of Electrified Vehicles*, vol. 13(2), 2023. doi: 10.4271/14-13-02-0009.
- [3] A. Golovan et al., «Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework», *Computers*, vol. 13(10), article 261, 2024. doi: 10.3390/computers13100261.
- [4] V. Eyring, H.W. Köhler, A. Lauer, and B. Lemper, «Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110, iss. D17, article D17306, 2005. doi: 10.1029/2004JD005620.
- [5] *Thermo efficiency system for reduction of fuel consumption and CO₂*. MAN Diesel and Turbo, 2014.
- [6] *Exhaust gas emission control today and tomorrow application on MAN B&W two-stroke marine diesel engines*. Copenhagen, Denmark: MAN Diesel Publ., 2008.
- [7] F. Baldi, and C. Gabriellii, «A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications», *Energy*, vol. 80, pp. 654-665, 2015. doi: 10.1016/j.energy.2014.12.020.
- [8] J. Jin, H. Lee, G. Park, and J. Choi, «Thermodynamic analysis of the organic rankine cycle as a waste heat recovery system of marine diesel engine», *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol. 36(7), pp. 711-719, 2012. doi: 10.3795/ksme-b.2012.36.7.711.
- [9] T. Koroglu, «Advanced exergy analysis of an organic rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant», *Journal of Thermal Engineering*, vol. 3(2), pp. 1136-1148, 2017. doi: 10.18186/thermal.298614.
- [10] O. Konur, O. Yuksel, S.A. Korkmaz, C.O. Colpan, O.Y. Saatcioglu, and I. Muslu, «Thermal design and analysis of an organic rankine cycle system utilizing the main engine and cargo oil pump turbine based waste heats in a large tanker ship», *Journal of Cleaner Production*, vol. 368, article 133230, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133230.
- [11] S.S. De La Fuente, and A.R. Greig, «Making shipping greener: comparative study between organic fluids and water for Rankine cycle waste heat recovery», *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 14(2), pp. 70-84, 2015. doi: 10.1080/20464177.2015.1077601.
- [12] M. Akman, and S. Ergin, «Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine», *Ships and Offshore Structures*, vol. 16(10), pp. 1104-1113, 2020. doi: 10.1080/17445302.2020.1816744.
- [13] L.A. Díaz-Secades, R. González, N. Rivera, J.R. Quevedo, and E. Montañés, «Parametric study of organic Rankine working fluids via Bayesian optimization of a preference learning ranking for a waste heat recovery system applied to a case study marine engine», *Ocean Engineering*, vol. 306, article 118124, 2024. doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118124.
- [14] S. Zhu, Z. Ma, K. Zhang, and K. Deng, «Energy and exergy analysis of a novel steam injected turbocompounding system applied on the marine two-stroke diesel engine», *Energy Conversion and Management*, vol. 221, article 113207, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113207.
- [15] S. Zhu, K. Sun, S. Bai, and K. Deng, «Thermodynamic and techno-economic comparisons of the steam injected turbocompounding system with conventional steam Rankine cycle systems in recovering waste heat from the marine two-stroke engine», *Energy*, vol. 245, article 123245, 2022. doi: 10.1016/j.energy.2022.123245.
- [16] X. Liu, M.Q. Nguyen, J. Chu, T. Lan, and M. He, «A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine», *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, article 121502, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121502.
- [17] J. Zhemin, and Y. Yuxin, «Analysis of waste heat utilization of ship main engine», *E3S Web of Conferences*, vol. 165, article 06027, 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202016506027.
- [18] M. Akman, and S. Ergin, «An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions», in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, vol. 233(2), pp. 586-601, 2018. doi: 10.1177/1475090218770947.

- [19] O. Konur, C.O. Colpan, and O.Y. Saatcioglu, «A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications», *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*, vol. 44(2), pp. 4083-4122, 2022. doi: **10.1080/15567036.2022.2072981**.
- [20] G. Theotokatos, A. Rentizelas, C. Guan, and I. Ancic, «Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles», *Journal of Cleaner Production*, vol. 267, article 121837, 2020. doi: **10.1016/j.jclepro.2020.121837**.
- [21] A. Golovan et al., «Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals», *SAE Technical Papers*, 2018-01-1774, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1774**.
- [22] A. Golovan, I. Gritsuk, M. Kurtsev, O. Ischuka, and R. Vrublevskyi, «Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions», *ICTE in Transportation and Logistics*, pp. 295-301, 2019. doi: **10.1007/978-3-030-39688-6_37**.
- [23] A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, «Aspects of forming the information V2I model of the transport vessel», in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, 2019, pp. 390-393. doi: **10.1109/mees.2019.8896595**.
- [24] A. Golovan, I. Gritsuk, and I. Honcharuk, «Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 5, pp. 77-84, 2023. doi: **10.33271/nvngu/2023-5/077**.

Стаття надійшла 23.04.2025

Стаття прийнята 07.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Гончарук І.П. Перспективні напрями підвищення енергетичної та екологічної безпеки засобів водного транспорту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 254-263. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336423>.

МЕТОДИЧНЕ ПІДГРУНТЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ ДНОПОГЛИБЛЕННЯ В РАЙОНАХ АКВАТОРІЙ І СУХОДОЛУ

Науменко А.В. аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8025-2790>, e-mail: captainnaumenko@gmail.com;
Капочкіна М.Б. канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4893-2523>, e-mail: kapochkinamargarita@gmail.com

Розглянута проблема обрання оптимальних трас судноплавних каналів в районах алювіальних площин суходолу та районах акваторій з акумулятивним рельєфом морського дна. Критерієм обрання трас судноплавних каналів є мінімізація витрат на днопоглиблювальні роботи на етапі побудови каналу. Зазвичай це досягається мінімізацією дистанції. Критерій замулювання каналу в процесі експлуатації зазвичай враховується у другу чергу, бо на сучасному науково-технічному рівні критерій визначення замулюваності каналів не є досконалими. З отриманням нових знань в галузях флюїдодинаміки, структуроутворення літосфери було створено наукове підґрунтя для оптимізації, вже з урахуванням фактору замулювання, проєктування траси судноплавного каналу. Таким чином, штучне втручання у природні процеси шляхом днопоглиблювання почало обирати риси ергономічності. Запропоновано алгоритм лінеamentного аналізу структуроутворення земної поверхні за гіпотезою К.Ф. Тяпкіна. Як приклад реалізації алгоритму районування земної поверхні, включаючи суходіл і акваторію, запропоновано схему блокової подільності південно-східної частини Туреччини. Алгоритм картографування блокової подільності твердої оболонки Землі у спрощеному варіанті реалізовано для акваторії Дністровського лиману, як перспективного міжнародного водного шляху Дубосари – Білгород-Дністровський. Проаналізовано сучасні можливості програмного забезпечення з розпізнавання образів для автоматизації процесу вибору оптимальної траси судноплавного каналу за критерієм мінімізації замулювання. Вдосконалено ротаційну гіпотезу структуроутворення. На прикладі планетарної активізації процесу структуроутворення в період геодинамічної епохи 2005-2006 років показано, що змінення азимуту дії руйнівних припливних геодиформаций земної поверхні може відбуватися за стабільних ротаційних умов і без раптових змін нахилу вісі обертання Землі.

Ключові слова: суднопластво, морська навігація, логістика, судноплавні канали, днопоглиблювальні роботи, замулювання судноплавних каналів, флюїдодинаміка, структуроутворення літосфери.

Постановка проблеми

У роботах [1-8] розглянуто проблематику забезпечення навігації, вантажоперевезень морськими та річковими транспортними шляхами. Важливою складовою забезпечення навігації на річкових та морських транспортних шляхах є днопоглиблювальні роботи. В рамках підвищення ефективності проєктування днопоглиблювання розглянута проблема обрання оптимальних трас судноплавних каналів в районах алювіальних площин суходолу та мілководних районів акваторій з акумулятивним рельєфом морського дна. Критерієм обрання напрямку судноплавних каналів, які майже завжди є прямолінійними, зазвичай є мінімізація дистанції, як фактору мінімізації витрат на днопоглиблювальні роботи. Критерій замулюваності судноплавного каналу під час його експлуатації зазвичай враховується у другу чергу, бо на сучасному науковому рівні досі не існує чітких критеріїв визначення ступеню замулювання каналів. З отриманням нових знань в галузях флюїдодинаміки, структуроутворення літосфери, формування акумулятивного рельєфу морського дна з'явилася підґрунтя для розробки методики, алгоритмів та технічних рішень, що направлені на оптимізацію проєктування днопоглиблювання в районах акваторій і русел річок з метою зменшення сумарних затрат на побудову та обслуговування судноплавного каналу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В останні роки в Україні у галузі геодинаміки та гідрогеології опубліковані результати наукових досліджень, що мають пріоритетний характер і мають бути реалізовані на практиці у вигляді методичних рішень, наприклад, з оптимізації проєктування днопоглиблювання в районах акваторій і русел річок з метою зменшення сумарних затрат на побудову та обслуговування судноплавних каналів. Тобто, у напрямку морської та річкової навігації вже існує науково обґрунтована перспектива щодо формування нового методичного підходу до проєктування днопоглиблювальних робіт. У подальшому повинна змінитися і парадигма днопоглиблювальних робіт. Знання стосовно раніше невідомих особливостей процесів руслоутворення на суходолі та рельєфоутворення в акумулятивних (мілководних) районах акваторій сприяють тому, щоб штучне втручання у природні процеси шляхом виконання днопоглиблювальних робіт обрало риси ергономічності. Це стає реальним завдяки врахуванню того, що сучасні геодинамічні процеси діють у сукупності з гідрогеологічними процесами в рамках ендегенної флюїдодинамічної теорії безперервної трансформації річкової мережі на суходолі та мілководного рельєфу акваторій [3-5]. Флюїдодинамічні процеси найбільш суттєво впливають на трансформацію дельтових ділянок річкових русел. В монографії [1] нами узагальнені базові

положення ендегенної теорії рельєфоутворення. Під час написання монографії в першу чергу були враховані результати наукових досліджень, виконаних Інститутом геологічних наук НАНУ [9, 10], інших авторів [2-4, 11-14]. В останні роки, завдяки вагомому науковому внеску відомого українського вченого член-кореспондента НАНУ К.Ф. Тяпкіна [15, 16], створене підґрунтя для ревізії екзогенної гіпотези формування річкових русел на суходолі та жолобів в районах акваторій, що дозволить підвищити ефективність навігаційного забезпечення річкового та морського транспорту. К.Ф. Тяпкін на базі даних наукових досліджень емпіричного характеру, врахувавши теоретичні досягнення у напрямку досліджень ротаційних ефектів, висунув гіпотезу, що за сучасної орієнтації осі обертання Землі, реалізується процес структуроутворення поверхні Землі тектонічними блоками з орієнтацією 0° і 270° . У геологічному минулому, коли орієнтація осі обертання Землі неодноразово змінювалося, в рельєфі нашої планети були сформовані тектонічні блоки з іншими азимутами простягання: 17° і 287° ; 35° і 305° ; 45° і 315° ; 62° і 332° ; 77° і 347° . Результати геологічного картографування суходолу і акваторій показують, що підпорядкованість зазначених тектонічних блоків утворюється відповідно до теорії фракталів. Тобто утворення блокової будови літосфери у просторі відбувалося і відбувається дискретно. Базовий просторовий масштаб блокового структуроутворення відповідає розміру тектонічних блоків 140 ± 10 км. Однак слід нагадати, що ще у 50-ті роки ХХ сторіччя про фрактальний характер прояву планетарних розломів з азимутами простягання: 15° ; 30° ; 60° ; 75° було відомо [17] (рис. 1).

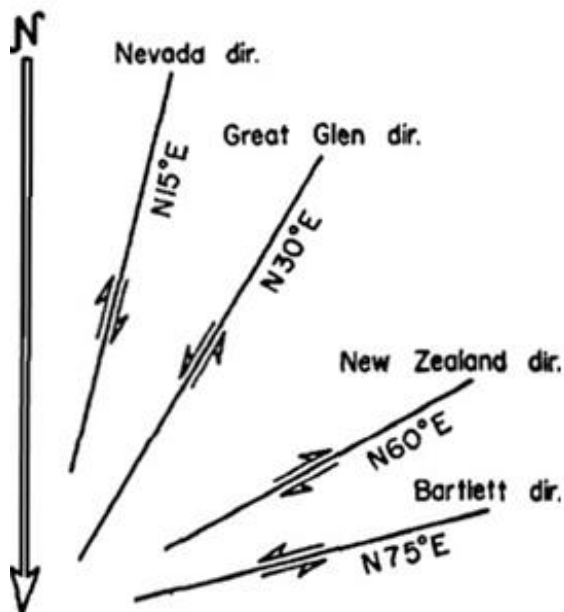


Рис. 1 – Схема планетарних розломів [17]

Згодом зазначені у публікації [17] азимуті 15° ; 30° ; 60° ; 75° були уточнені у теорії К.Ф. Тяпкіна і зараз відповідають значенням азимутів 17° ; 35° ; 62° ; 77° , відповідно. Важко переоцінити теоретичні та практичні наслідки впровадження ротаційної теорії структуроутворення, яка дозволяє з єдиної геодинамічної позиції показати причинно-наслідковий зв'язок між тектонікою та іншими процесами в твердій оболонці нашої планети, у тому числі з процесом руслоутворення річок, трансформації берегової смуги морів, акумулятивних форм мілководдя, у тому числі природних жолобів на морському дні. Завдяки новій гіпотезі структуроутворення, відкрилися можливості районування простору за ознакою блокової подільності Земної кори і перспективи діагностування сучасного стану та прогнозування тенденцій майбутніх трансформацій акумулятивного рельєфу морського дна та річкової мережі суходолу.

Результати наукових досліджень Інституту геологічних проблем НАН України [9,10] опосередковано підтверджують наукові висновки, опубліковані у наукових працях К.Ф. Тяпкіна, та зі свого боку об'єктивно обґрунтовують науковий напрям, що розглядає геофлюїдодинамічні структури, як канали вертикальної міграції пластових та глибинних флюїдів, які відіграють активну роль у формуванні річкової мережі. Фізична модель впливу геофлюїдодинамічних структур на формування рельєфу суходолу враховує, в першу чергу, процеси тектонічного розщільнення гірських порід [9, 10]. Слід розуміти, що прояви підземного живлення диференційовані у просторі і максимально помітні у зонах підвищеної проникності земної кори, тобто в межах геофлюїдодинамічних структур. Геофлюїдодинамічні структури суходолу проявлені процесами перезволоження ґрунтів. Активний прояв геофлюїдодинамічних структур зумовлює їх вплив практично на всі компоненти сучасних ландшафтів (рельєф, річкова гідромережа, конфігурація берегової смуги). Приналежність певних ділянок річкового русла до геофлюїдодинамічних структур літосфери обумовлює їх прямолінійність, схожість геометрії їх контурів та повторюваність напрямків, що характерні для зон розривних порушень земної кори. Для умов суходолу нами пропонується використовувати зазначені природні процеси для вдосконалення теорії руслоутворення та на її основі – розробки практичних методів підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт.

Для районів акваторій нами сформульовано нову парадигму акумулятивного рельєфоутворення, в основі якої лежить ефект вертикальних потоків рідини в гідросфері над зонами розломів, що блокують процес відкладення наносів і, таким чином, сприяють формуванню жолобів [1]. Зазначена теорія формування жолобів та банок підтверджується результатами математичного гідродинамічного моделювання процесу відкладення наносів в районах флюїдодинамічних структур [3].

Наведені у роботах [6, 7] схеми районування територій за ознакою блокової подільності твердої оболонки Землі фактично є складовою частиною науково обґрунтованої методики прогнозування поточних змін русел річок в умовах сучасної епохи структуроутворення нашої планети. Тяпкін К.Ф. запропонував концепцію розвитку блокової подільності планети в різних геологічних епохах, що базується на ротаційній гіпотезі структуроутворення Земної поверхні [17]. Таким чином, у історичному минулому утворювалися мережі розломів різних порядків (рангів), орієнтованих у напрямку, перпендикулярному (ортогональному) до напрямку орієнтації осі обертання Землі. Мережа розломів утворювалася за фрактальним принципом у відповідності до принципу ізостазії. Слід враховувати, що напрямки руху припливів у твердій оболонці Землі призводять до виникнення мережі розломів меридіонального та широтного напрямку.

Відповідно до методичного рішення щодо районування суходолу за критерієм блокової подільності літосфери, наведеного у монографії [14] нами, в кордонах України було виконано районування Придунав'я [6] і Придніпров'я [7]. Досліджено, яким чином блокова подільність літосфери впливає на руслові процеси в районі алювіальної Кілійської дельти Дунаю та на процеси руслоутворення Дніпра, що знаходиться в принципово інших геологічних умовах – на площині кристалічного щита.

У монографії [1] нами розглядається процес рельєфоутворення у північно-західній частині Чорного моря, донні відкладення якої сформовані твердим стоком Дніпра, південного Бугу, Дністра та Дунаю і за таких умов рельєф морського дна повинен бути плоским.

Система з азимутом 62° і 332° , що формує структури Кримського півострову (піднятий блок 140×140 км) та Азовського моря (занурений блок 140×140 км), система з азимутом 17° і 287° представлена надводною акумулятивною формою – Тендрівська коса – о. Джарилгач, а сучасна система з азимутом 0° і 270° проявлена підняттям, що проявлений контуром ізобати 20 м на ділянці акваторії від Одеської до Каркініської заток. Слід підкреслити, що зазначена схема надає наукове обґрунтування для обрання ефективних рішень щодо днопоглиблювання у портах: Черноморське (азимут 332°); Донузлав (азимут 62°); портах агломерації Севастополя (азимут 0° і 270°).

В аспекті забезпечення навігації у «вузкостях», найцікавішою є ділянка акваторії від дельти Дніпра до Одеської затоки, що у рельєфі дна представлена прямолінійною природною депресією, сформованою під кутом з азимутом 270° та довжиною приблизно 140 км, яка на сході є Дніпро-Бузьким лиманом, а на заході – жолобом між береговою смугою і Одеською Банкою з глибинами до 20 м і більше.

Наведені приклади наочно підтверджують суттєвий вплив на ефективність вантажоперевезення

річковим та морським шляхами блокової подільності земної кори.

Мета статті

Поглиблення теоретичних знань у напрямку флюїдодинаміки і структуроутворення для автоматизації процесу визначення місця прокладання траси підхідного каналу.

Виклад основного матеріалу

Науково доведено, що в сучасному історичному періоді відбувається перебудова 5-ти існуючих тектонічних структур минулих геологічних епох на сучасну з азимутами просторової орієнтації 0° і 270° . А невідомість полягає у тому, чи актуальною є перспектива виникнення нової тектонічної структури з новою просторовою орієнтацією та у який часовий термін це може відбутися.

У роботі [18] детально розглянуто питання планетарної тріщинуватості поверхні Землі та вплив ротаційних процесів на її формування. Головним наслідком цих процесів вважають виникнення в земній оболонці планетарної тріщинуватості, що має субвертикальне падіння. До цієї категорії автори монографії відносять густу систему спочатку субвертикальних тріщин глибиною до 1 км, у просторовому орієнтуванні яких виявляється зв'язок із положенням осі обертання Землі.

У монографії [13] вперше висловлено припущення про те, що зміни положення осі обертання Землі не обов'язкові для утворення існуючих систем блокової ділимості літосфери з азимутами 0° і 270° ; 17° і 287° ; 35° і 305° ; 45° і 315° ; 62° і 332° ; 77° і 347° . Ще в класичній мобілістській гіпотезі А. Вегенера у якості рушійної сили дрейфу твердої оболонки нашої планети розглядалося осьове обертання Землі. Найточніша модель кінематики твердої оболонки нашої планети з урахуванням ротаційного фактору запропонована А.А. Смітом та Ч. Левісом [13]. Аналіз змін координат географічного полюса за останні 110 років показує, що вимушений рух відбувається по еліпсу (велика піввісь 3,4-2,7 м, мала піввісь 2,5-1,8 м, ексцентриситет 0,15-0,46 м, а довгота великої півосі $205-145^\circ$ сх. д.).

При обертанні Землі навколо осі неминуче відбувається відставання літосфери від мантиї, океану від літосфери, атмосфери від літосфери і океану. Тверда оболонка нашої планети ковзає астеносферою в західному напрямку із середньою швидкістю 5 см/рік.

У роботі [13] обґрунтовано тезу про те, що точка, в якій вісь обертання перетинає земну поверхню і переміщується із заходу на схід, може відображати зсув земної кори щодо нерухомої осі обертання Землі. Встановлено, що протягом всього періоду спостережень північний полюс зміщувався зі швидкістю близько 10 см/рік за складною траєкторією з переважним напрямком у бік Північної Америки (меридіан 290° сх. д.). Таким чином, гіпотеза К.Ф. Тяпкіна про те, що основна причина деформацій літосфери – зміна форми

Землі внаслідок епізодичного зміщення її осі обертання, нині набула ширше розуміння процесу структуроутворення.

У монографії [13] наведено результати дослідження наслідків раптової зміни траєкторії руху точки, в якій вісь обертання перетинає земну поверхню, що відбулася у листопаді 2005-лютому 2006 рр., та часові зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі в зазначений проміжок часу (рис. 2). У цей період зафіксовано раптове безпрецедентне короткочасне реверсивне пересування Північного географічного полюсу Землі відносно літосфери у напрямку Північної Америки приблизно на 120 см.

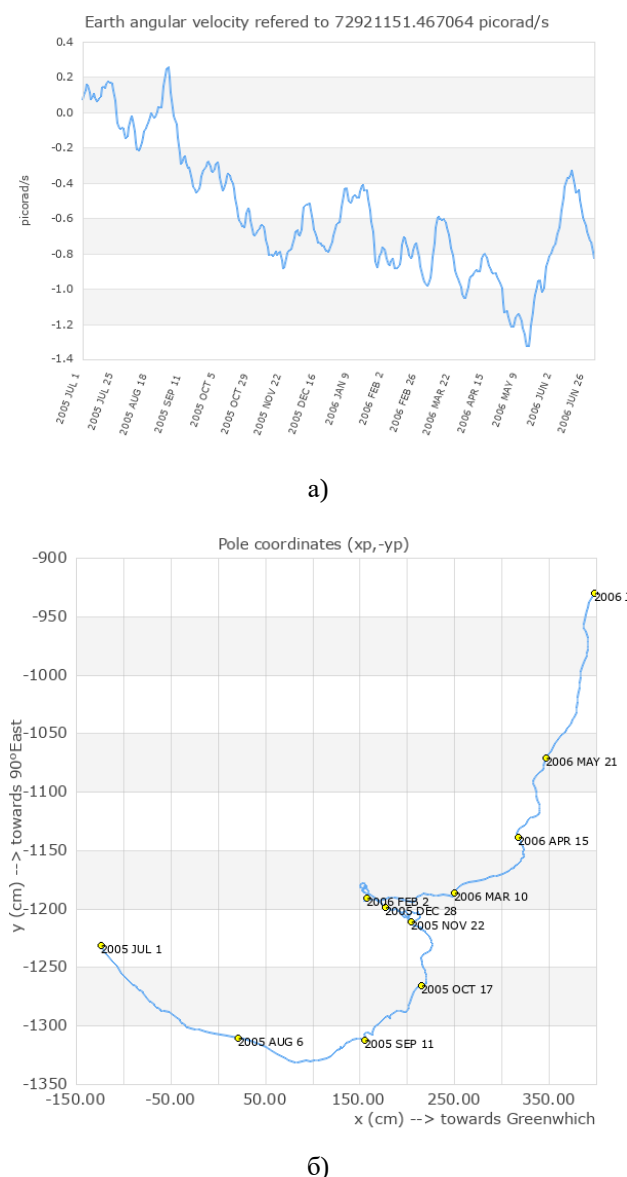


Рис. 2 – Часові зміни: а) траєкторії руху точки, в якій вісь обертання перетинає Земну поверхню; б) кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у 2005-2006 рр. [13]

Звернемо увагу на те, що відхилення проекції географічного полюсу на земну поверхню відбувалося приблизно в 4 рази повільніше у порівнянні з зворотнім рухом.

Вважається, що ротаційні ефекти (зміна нахилу осі обертання Землі) тотожні змінам форми Землі і повинні бути проявлені зміною швидкості обертання Землі. На рис. 2а наведено графік часових змін аномалій швидкості обертання Землі з липня 2005 до липня 2006 р. Згідно наведеному графіку, у термін з листопада 2005 до березня 2006 суттєвих змін швидкості обертання Землі не було зафіксовано. Тобто процес, що відбувся у термін з листопада 2005 до березня 2006 р. і проілюстрований на рис. 2б, відбувався в умовах стабільної швидкості обертання Землі. Згадаємо що за умов від'ємної аномалії швидкості обертання, наша планета знаходиться у формі, більш близької до еліпсоїду обертання, ніж до сфероїду. За таких умов розломи у твердій оболонці Землі стають ширшими. У роботі [13] було визначено, що процес відносного зсуву географічного полюсу відносно рухомої твердої оболонки Землі супроводжувався:

розростанням рифту у Каліфорнійській затоці 31.08.2005-02.09.2005 р. (за умов максимуму швидкості обертання Землі зсув літосфери по астеносфері раптово припинився);

зсувом Північної півкулі відносно Південної вздовж трансформного розлому екваторіальної зони (09.09.2005 - 02.10.2005)

асейсмічним розростанням Східно-Африканського рифту на ширину 8 м на довжині 60 км Східно-Африканського рифту (вересень 2005 р.);

розростання Тихоокеанського, Атлантичного, Індоканського рифтів (осінь 2005 - весна 2006 р.);

безпрецедентне зростання амплітуди руйнівних асейсмічних геодеформацій (збільшення у 5 разів кількості руйнувань інженерних споруд);

реверсивним вертикальним рухом морського дна Північного моря 24-26 листопада 2005 р., що супроводжувалося регіональними змінами форми геоїду (траєкторія зсуву літосфери на астеносфері повернулася по колу).

Також відбулися раптові зміни і у гідросфері. Так у жовтні 2005 р. найпотужніша річка у світі, що тече вздовж екватору, маєть на увазі Амазонка, практично обміліла, а у лютому 2006 р. на ній відбулася найпотужніша повінь.

Виконаємо аналіз подій, що відбулися. Відповідно до гіпотези К.Ф. Тяпкіна, у сучасну геодинамічну епоху перебудова блокової структури твердої оболонки Землі відбувається вздовж розломів, що зорієнтовані за широтою та довготою.

• Русло річки Амазонка зорієнтовано вздовж екватору (азимут 270°), тобто тектонічні процеси, з якими пов'язана посуха у жовтні 2005 р. і повінь у лютому 2006 р., відбулися вздовж розломів з відповідним азимуту просторової орієнтації.

- Зсуви північної півкулі відносно південної відбувалися вздовж екваторіальних трансформних розломів (азимут 270°).

- Розростання рифту у Каліфорнійській затоці та Східно-Африканського рифту відбулося у напрямку південь-північ, тобто вздовж розломів з азимутом протягання 0° .

Таким чином, виконаний аналіз дає підстави для підтвердження тези стосовно того, що структуроутворення нашої планети відбувається і за умов раптових

зсувів твердої оболонки Землі навколо осі обертання, яка може залишатися нерухомою. Тобто, фрактальна зміна орієнтації блокової подільності може генеруватися під час раптового зсуву твердої оболонки нашої планети. Сили, що формують нову структуру твердої оболонки, представлені припливоутворюючими силами (рис. 3), що безперервно деформують нашу планету у напрямку широт (секторіальні (півдобові) та тесеральні (добові) припливи) та довгот (зональні двотижневі та піврічні припливи).

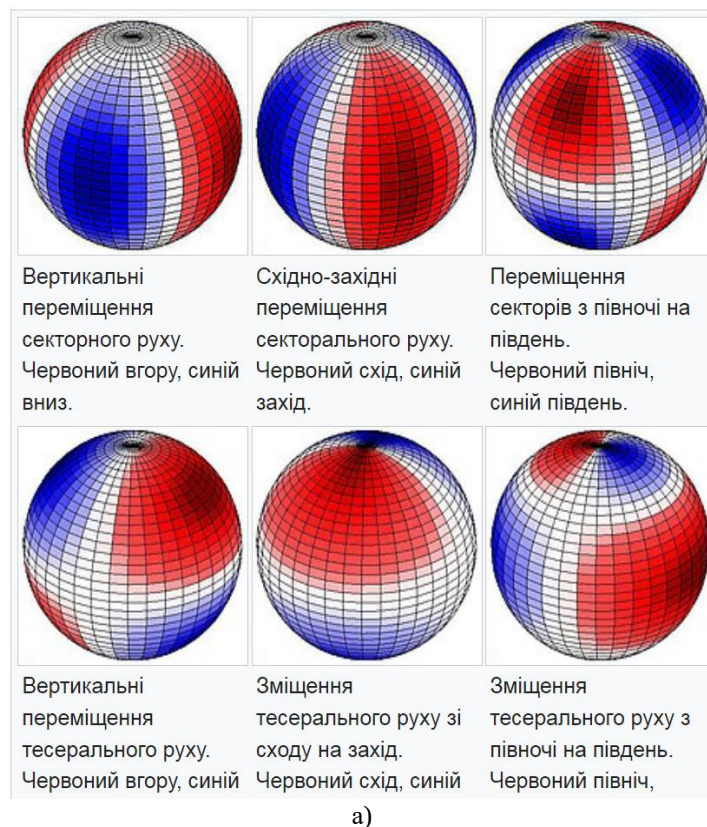


Рис. 3 – Схематичне зображення припливів у тілі Землі: а) секторіальні та тесеральні, б) зональні припливи [19]

Геодинамічні події, що відбулися у 2005-2006 роках, свідчать про актуальність проблеми перебудови структури нашої планети у сучасний історичний період внаслідок вірогідного зсуву твердої оболонки відповідно схемі, що зображена на рис. 2а.

Отримані результати

Нами було запатентовано спосіб [8], у якому науково обґрунтовано алгоритм оптимізації траси судноплавних каналів з урахуванням блокової подільності земної кори, що проявлена флюїдодинамічними структурами. Для автоматичного виявлення лінійних структур на топографічних картах, супутникових знімках, інших картографічних матеріалах використовуються методи розпізнавання образів (комп'ютерного аналізу лінеаментів) – LESSA, Rockworks, ERDAS IMAGINE, ENVI та інші. Так, у роботі [20] пропонується застосовувати лінеаментний аналіз багатоспектральних та гіперспектральних супутникових зображень для виявлення флюїдодинамічних структур шляхом фіксації прямолінійних зон «вертикального руху пластів флюїдів».

Спрощена схема алгоритму полягає у тому, що для кожної суміжної пари пікселів зображення обраховується певна статистична оцінка і приймається рішення – чи визнається зазначений відрізок зображення лінеаментом. Приклад результату покрокової реалізації алгоритму лінеаментного аналізу показано на рис. 4.

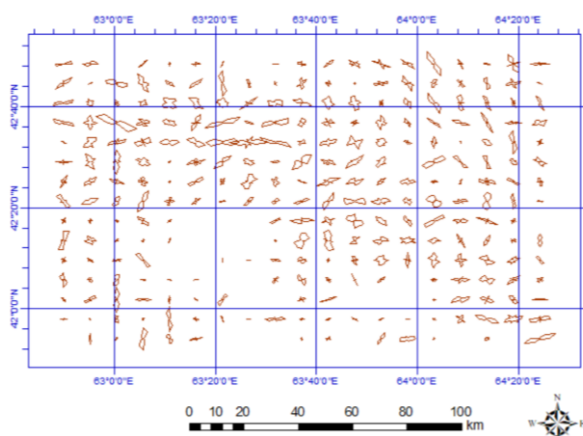


Рис. 4 – Схематичне зображення лінеаментного аналізу на етапі попередньої обробки даних [20]

За результатами попередньої обробки вхідних даних визначені лінеаменти об'єднуються у прямолінійні відрізки.

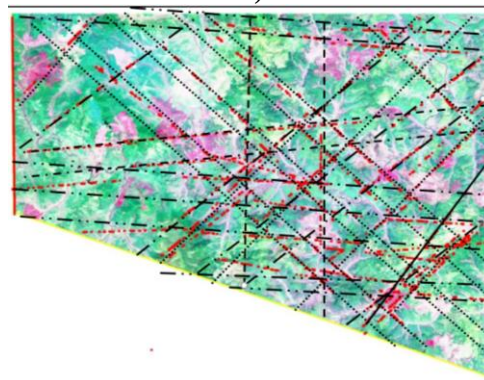
На рис. 5 показано приклад практичної реалізації ПЗ LESSA для виявлення лінеаментів в рельєфі суходолу.

За вхідними даними супутникового зображення (рис. 5а) будується карто-схема з виявленими прямолінійними відрізками 5б. Враховуючи базові принципи гіпотези К.Ф. Тяпкіна нами виконано об'єднання фрагментів одного азимуту в систему. Визначено 5 з шести

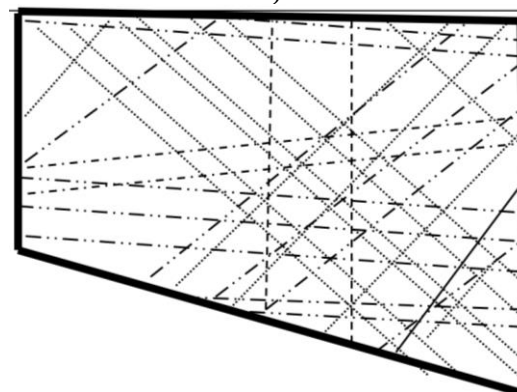
існуючих азимутів блокової подільності (рис. 5в). Далі, система блокової подільності обраної ділянки суходолу виділяється окремо, як базова схема для побудови загальної схеми за 6-ма відомими напрямками блокової подільності.



а)



б)



в)

Рис. 5 – Карти-схеми: а) супутниковий знімок ділянки суходолу; б) лінеаментів (червоний колір), що були закартографовані шляхом застосування ПЗ LESSA; в) скорегованих нами лінеаментів за критерієм азимуту простягання

Результати лінеаментного аналізу, наведені на рис. 5а, нами були доопрацьовані відповідно до базових положень ротаційної теорії К.Ф. Тяпкіна, яка передбачає безперервність у просторі блокової подільності твердої оболонки Землі. Як результат, ми отримали 4 типи мереж з різними азимутами блокової подільності. Зазначений результат не відповідає вимогам до

схем блокової подільності, якими оперують послідовники К.Ф. Тяпкіна. Тобто, доопрацьована нами (рис. 5в) схема комп'ютерного розпізнання образів не є бездоганною, тобто алгоритм ПЗ лінеamentного аналізу не передбачає визначення фрагменти всіх шести існуючих геодинамічних структур твердої оболонки нашої планети.

Алгоритм лінеamentного аналізу структуроутворення за гіпотезою К.Ф. Тяпкіна

Крок 1. У картографічній програмі Google Earth обирається ділянка земної поверхні з таким розміром (масштабом), щоб кривизна широт і довгот на її кордонах не досягала похибки 2.5° у порівнянні з її середньою частиною.

Крок 2. З використанням спеціального програмного забезпечення з лінеamentного аналізу в автоматичному режимі, тобто об'єктивно, виявляється базова лінія для кожного азимуту блокової подільності, як це показано на рис. 5.

Крок 3. Для кожного з напрямків окремо за даними лінеamentного аналізу виявляється фрагмент блокової подільності з базовим просторовим масштабом $145 \times 145 \text{ км} \pm 5 \text{ км}$.

Крок 4. Для кожного з напрямків окремо, до виявленого фрагменту блокової подільності з базовим просторовим масштабом $145 \times 145 \text{ км} \pm 5 \text{ км}$ добудовуються блоки аналогічного розміру. Таким чином отримуються 6 мереж базового просторового масштабу.

Крок 5. Для кожної з 6-ти мереж базового просторового масштабу за ознакою висот визначаються підняті та занурені блоки.

Крок 6. Для кожної з 6-ти мереж базового просторового масштабу за ознакою висот визначаються нахили блоків.

Крок 7. Кожна з 6-ти мереж базового просторового масштабу $145 \times 145 \text{ км} \pm 5 \text{ км}$ ієрархічно ділиться на блоки: $70 \times 70 \pm 2,5 \text{ км}$; $35 \times 35 \pm 1,25 \text{ км}$; $17,5 \times 17,5 \pm 0,62 \text{ км}$; $8,75 \times 8,75 \pm 0,32 \text{ км}$; $4,37 \times 4,37 \pm 0,176 \text{ км}$; $2,18 \times 2,18 \pm 0,09 \text{ км}$.

Як приклад районування земної поверхні, включаючи акваторію, пропонуємо розглянути схему блокової подільності південно-східної частини Туреччини, яка охоплює затоку Юмурталик на північному-сході Середземного моря (рис. 6).

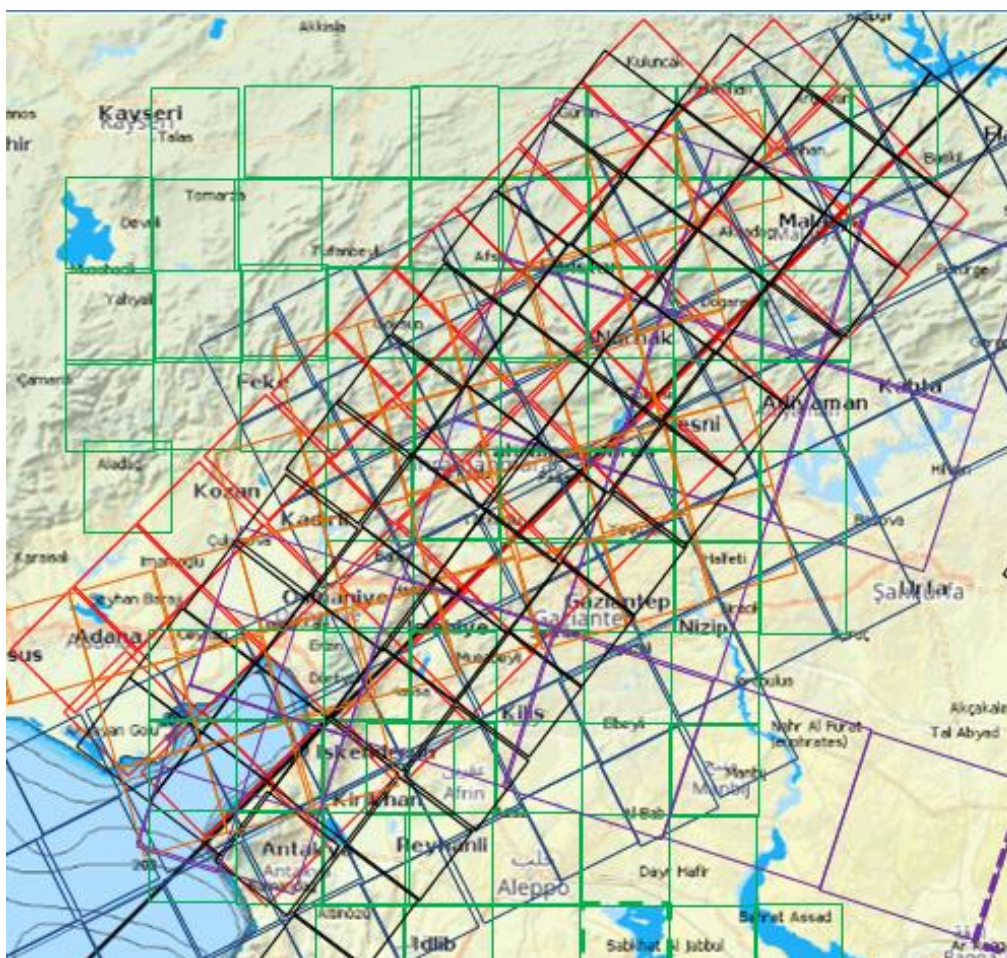


Рис. 6 – Схема блокової подільності південно-східної частини Туреччини з масштабом $35 \times 35 \text{ км}$: 0° і 270° (зелений); 17° і 287° (фіолетовий); 35° і 305° (чорний); 45° і 315° (червоний), 62° і 332° (синій); 77° і 347° (коричневий)

На зазначений схемі показані усі шість орієнтацій блокової подільності, які емпіричним шляхом були виявлені К.Ф. Тяпкіним. Найбільша площа, що охоплена районуванням, відповідає сучасній системі, що зорієнтована за азимутами 0° і 270° та виділена зеленим кольором.

Алгоритм картографування блокової подільності твердої оболонки Землі у спрощеному варіанті спробуємо реалізувати для акваторії Дністровського лиману з метою навігаційного забезпечення водного шляху міжнародного значення Дубосари - Білгород-Дністровський. Спрощеність завдання обумовлена тим, що рельєф суходолу в районі Дністровського лиману безальтернативно наслідують блокову подільність з азимутом 35° і 305° , тобто як і русло річки Дніпро.

У 1997 році Молдова ратифікувала Європейську угоду про внутрішні водні шляхи міжнародного значення. У цьому документі річка Прут (від Унген до естуарію – впадання в Чорне море) та річка Дністер (від Бендер до українського Білгород-Дністровська) визнані водними шляхами міжнародного значення, які мають бути відкриті для судноплавства. У Міністерстві інфраструктури України у 2018 р. було запропоновано ухвалити рішення про відкриття пункту пропуску на річці Дністер на кордоні між Україною та Молдовою в районі населеного пункту Паланка. Визначено пункти, які доцільно з'єднати Дністровським лиманом в рамках задекларованого міжнародного транспортного шляху Прутом та Дністром. Крім цього, актуальна оптимізація логістики портів Південний, Одеса,

Чорноморськ через канал Овідіополь – Білгород-Дністровський. Слід зазначити, що від Цареградського гирла лиману до Білгород-Дністровська прокладений судноплавний канал, що з'єднує лиман з Чорним морем.

Напрямки з'єднання лиманом: Паланка – Білгород-Дністровський; Овідіополь – Білгород-Дністровський; Маяки – Білгород-Дністровський (оперативний рівень). Стратегічні напрямки – це з'єднання судноплавними каналами Паланки та Овідіополя з Білгород-Дністровським. До напрямків тактичного рівня слід віднести з'єднання судноплавними каналами Маяк з Білгород-Дністровським.

У монографії [18] наведено тектонічну схему блокової будови північно-західного Причорномор'я, як основи моделювання можливих подальших змін берегової зони Чорного моря від дельти Дунаю до Одеської затоки. У цій монографії вперше запропоновано та застосовано принципи геоморфологічного районування територій з урахуванням блокової будови земної кори за К.Ф. Тяпкіним. Вирішення поставленої задачі потребує обрання лише двох базових ліній. Це стара мережа 35° і 305° і сучасна мережа 0° і 270° .

За базову лінію старої мережі прийнято просторове положення пересипу коса Бугаз, а сучасної мережі – східний кордон узбережжя Кілійської дельти, сформований у 1700 році.

На рис. 7 наведена схема блокової подільності твердої оболонки Землі в акваторії Дністровського лиману за старим (35° і 305°) і сучасним (перспективним, 0° і 270°) азимутами блокової подільності.

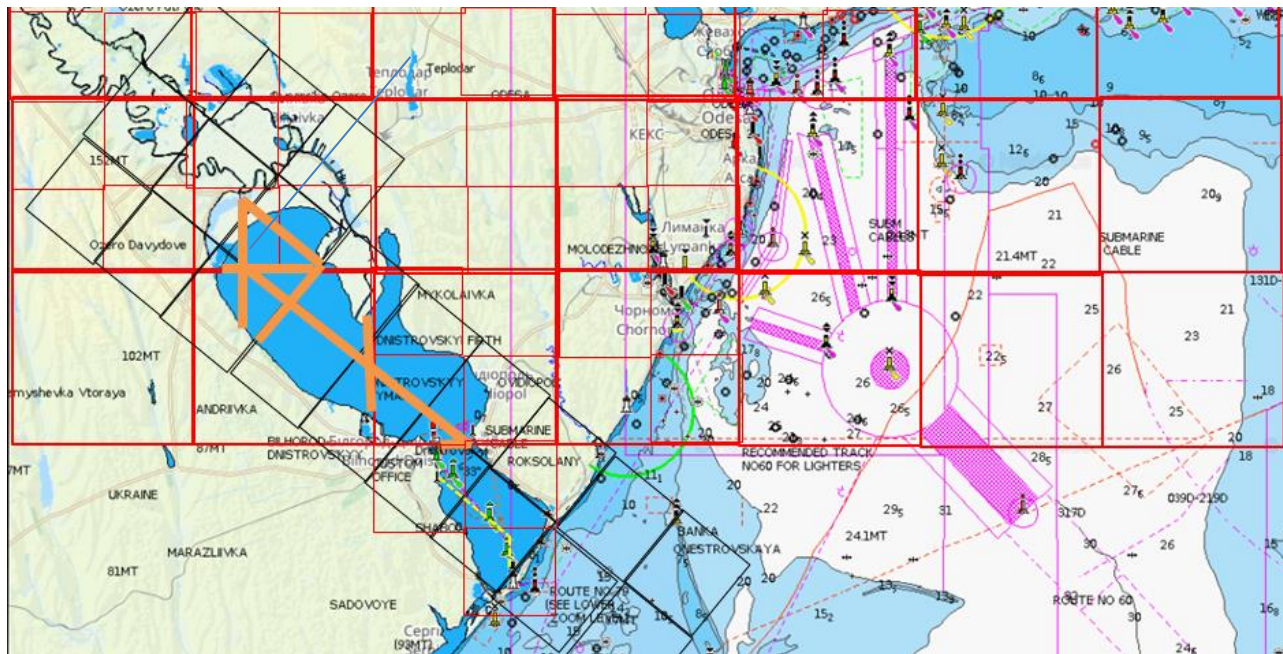


Рис. 7 – Мережі флюїдодинамічних структур з масштабом 8,5х8,5 км та 17х17 км та азимутами 35° і 305° (чорний колір) і 0° і 270° (червоний колір); структури, які доцільно використати для оптимізації судноплавних шляхів, представлені помаранчевим кольором

Побудова судноплавних каналів повинна враховувати ранг флюїдодинамічних структур, бо структури більшого рангу мають більшу ширину та більший дебіт підземного живлення, що запобігає замулюванню каналу під час експлуатації. Оптимальним рішенням визнано варіант, наведений на рис. 8.

Головним елементом лінеamentного аналізу може вважатися динамічна дельта Дністра, що формує два рукави, один з яких має напрямок 35° , а інший 0° . Важливо відмітити, що схема оптимізації судноплавних каналів лише у одному випадку передбачає найкоротший прямолінійний шлях – це судноплавний канал Овідіополь – Білгород-Дністровський. Канал у напрямку на Паланку передбачає днопоглиблювальні роботи вздовж флюїдодинамічної структури найвищого рангу, бо вона у напрямку на південний-схід формує берегову смугу.

На нашу думку, доцільним є реаналіз наукової обґрунтованості траєкторії існуючого судноплавного каналу Білгород-Дністровський – Цареградське гирло, показаного на рис. 7 жовтим кольором. В результаті виконаного аналізу було встановлено, що він не є прямолінійним, а складається з двох прямолінійних ділянок. Найдовша прямолінійна ділянка каналу (8,5 км) прокладена у напрямку з азимутом приблизно 305° , інша ділянка вдвічі коротша і прокладена у напрямку з азимутом приблизно 347° . Місце зміни кута ділянки судноплавного каналу, прокладеного у напрямку з

азимутом 305° на напрямок 347° обрано таким чином, нібито автори проекту зазначеного судноплавного каналу були обізнані з новою гіпотезою структуроутворення К.Ф. Тяпкіна, оприлюдненою лише у 1998 році. На рис. 9 наведено результати застосування алгоритму врахування гіпотези структуроутворення К.Ф. Тяпкіна для оптимізації проектування днопоглиблювання, з урахуванням фактору замулювання, для структур з азимутом 77° і 347° та просторовим масштабом 17×17 км та $8,5 \times 8,5$ км в районі судноплавного каналу Білгород-Дністровський.

Відповідно до наведеної схеми, ділянка судноплавного каналу Білгород-Дністровський – Цареградське гирло, побудована відповідно азимуту 347° , у повній мірі відповідає новій гіпотезі структуроутворення К.Ф. Тяпкіна.

На схемі (рис. 10б) показано, що на виході з Цареградського гирла у море існує жолоб природного походження, що відповідає сучасній схемі блокової подільності твердої оболонки Землі з азимутом 0° і 270° [7]. В гирловій частині Дністровського лиману ця система чітко проявлена у рельєфі дна, що свідчить про активність флюїдодинамічних процесів вздовж системи 0° і 270° . Враховуючи те, що система 0° і 270° є сучаснішою, нами на рис. 10б пунктирними лініями показані перспективні напрямки майбутньої перебудови судноплавного каналу, що відповідають схемі, що наведена на рис. 7.

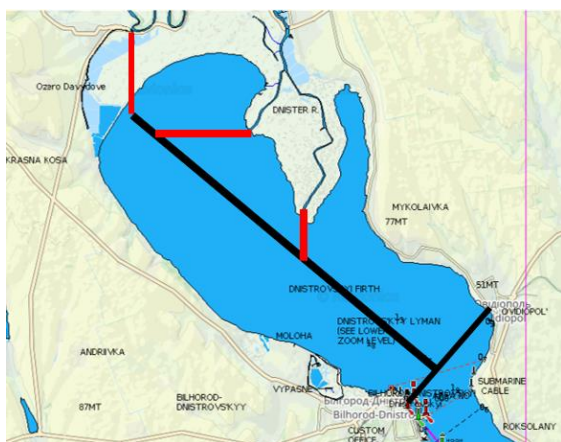


Рис. 8 – Схема з'єднання Дністровським лиманом (в рамках міжнародного транспортного шляху Прут – Дністер) річки Дністер з Чорним морем, з урахуванням флюїдодинамічних структур: азимути 35° і 305° (чорний колір) і 0° і 270° (червоний колір)

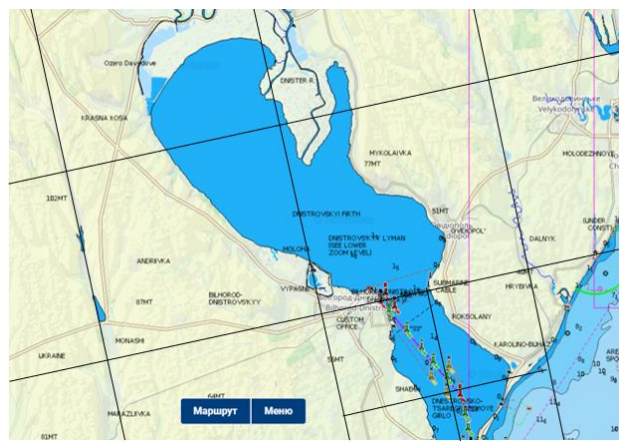


Рис. 9 – Схематичне зображення флюїдодинамічних структур з азимутом 77° і 347° та просторовим масштабом 17×17 км та $8,5 \times 8,5$ км в районі судноплавного каналу Білгород-Дністровський – Цареградське гирло

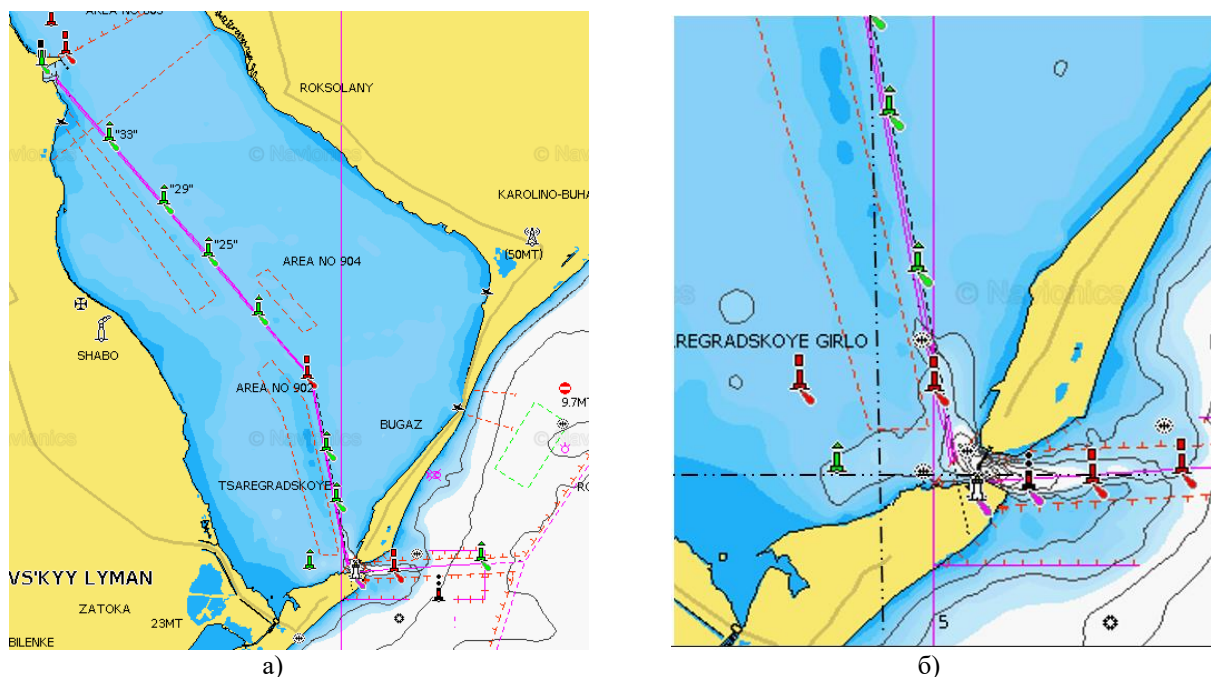


Рис. 10 – Схеми: а) судноплавного каналу Білгород-Дністровський – Цареградське гирло; б) південної ділянки зазначеного каналу

Висновки

Розглянута проблема обрання оптимальних трас судноплавних каналів в районах алювіальних площин суходолу та районах акваторій з акумулятивним рельєфом морського дна. Критерієм обрання трас судноплавних каналів є мінімізація витрат на днопоглиблювальні роботи в процесі побудови каналу, що зазвичай досягається мінімізацією довжини каналу. Критерій замулювання зазвичай враховується у другу чергу, бо на сучасному науково-технічному рівні визначення замулювання майбутнього каналу не є досконалими. Проаналізовано результати впровадження на практиці нових знань в галузях флюїдодинаміки, структуроутворення літосфери з метою оптимізації проектування днопоглиблювання на Дунаї та Дніпрі вже з урахуванням фактору замулювання. За рахунок цього, штучне втручання у природні процеси шляхом днопоглиблювання почало обирати риси ергономічності.

З урахуванням фактору замулювання представлені результати оптимізації проектування днопоглиблювання в районах портів північно-західної частини Чорного моря.

У якості проблемного питання, розглянуто невідомість сучасного стану блокової подільності твердої оболонки Землі, яке полягає у тому, чи актуальною є перспектива виникнення нової тектонічної структури з новою просторовою орієнтацією та у який часовий термін це може відбутися. В рамках зазначеного питання представлені результати дослідження геодинамічної епохи 2002-2005 рр., визначеної в роботі [13] як такої, що в результаті рухів твердої оболонки Землі по астеносфері наслідки набули катастрофічного

характеру. У якості результату запропоновано шляхи розв'язання проблемних питань щодо ротаційної гіпотези структуроутворення.

Проаналізовано сучасні можливості програмного забезпечення з розпізнавання образів для автоматизації процесу обрання оптимальної (за критерієм мінімізації замулювання) траси судноплавного каналу. Запропоновано алгоритм врахування гіпотези структуроутворення К.Ф. Тяпкіна для оптимізації проектування днопоглиблювання в районах акваторій і на суходолі, але вже з урахуванням фактору замулювання. Апробація запропонованого алгоритму виконана на прикладі вирішення задачі з практичної реалізації Європейської угоди про внутрішні водні шляхи міжнародного значення (забезпечення навігації від Унген на річці Прут до Чорного моря) на ділянці від Бендер (річка Дністер) до Білгород-Дністровська.

Перелік використаних джерел

- [1] Нова парадигма акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів: монографія / Гладких І.І., Капочкіна М.Б., Кучеренко Н.В., Капочкін Б.Б. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 199 с.
- [2] Перспективи розвитку оперативної океанографії в Україні: монографія / І.І. Гладких та ін. Одеса: Астропринт, 2017. 115 с.
- [3] Kapochkin B., Kucherenko N., Kapochkina M. Regularities in the transformation of coastal and accumulative forms of sea bottom relief, with application for water management. *Meteorology Hydrology and*

- Water Management*. 2014. Vol. 2(2). Pp. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/36422>.
- [4] Floods and droughts as a result of deformability of the geological environment / Kapochkin A., Kapochkin B., Kucherenko N., Uchytel I. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2015. Vol. 3(2). Pp. 3-7. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/58810>.
- [5] Михайлов В.И., Капочкина А.Б., Капочкин Б.Б. Взаимодействие в системе «Литосфера – гидросфера»: монография. Одесса: Астропринт, 2010. 154 с.
- [6] Науменко А.В., Капочкіна М.Б. Теорія і практика оптимізації проектування морських днопоглиблювальних робіт. *Водний транспорт*. 2025. Вип. 1 (42). С. 210-226. DOI: doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.24.
- [7] Науменко А.В., Капочкіна М.Б. Теорія і практика оптимізації проектування днопоглиблювальних робіт у руслах річок. *Водний транспорт*. 2025. Вип. 2 (43). С. 31-47. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.03>.
- [8] Спосіб визначення місця прокладання траси підхідного каналу: пат. 158155 Україна: МПК E02B5/04. № u202303072; заявл. 23.06.23; опубл. 08.01.25, Бюл. № 2. 2 с.
- [9] Перерва В.М., Лялько В.И., Шпак П.Ф. Новые данные о разломно-блоковой структуре северо-западного шельфа Чорного моря по данным аэрокосмических исследований (в связи с нефтегазоносностью). *Геологический Журнал*. 1994. № 4. С. 78-84.
- [10] Перерва В.М., Лялько В.И. Об эндогенной составляющей в температурной дифференциации поверхности Чорного моря. *Геологический журнал*. 1996. № 3/4. С. 123-128.
- [11] Учитель И.Л., Капочкин Б.Б. Смена парадигм современной геодинамики и сейсмотектоники: монография. Lap LAMBERT Academic Publishing, 2014. 74 с.
- [12] Геодинамика. Основы динамической геодезии: монография / Учитель И.Л., Дорофеев В.С., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Одесса: Астропринт, 2008. 311 с.
- [13] Геодинамика. Основы кинематической геодезии: монография / Войтенко С.П., Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Одесса: Астропринт, 2008. 264 с.
- [14] Современные изменения уровня Чорного моря как основа стратегии строительного освоения побережий: монография / В.И. Михайлов и др. Одесса: Астропринт, 2010. 165 с.
- [15] Тяпкин К.Ф. Блоки земной коры с позиций новой гипотезы структурообразования. *Геологический журнал*. 1993. № 4. С. 10-20.
- [16] Довбнич М.М., Тяпкин К.Ф. Новая ротационная гипотеза структурообразования и ее роль в развитии наук о Земле: учебник. Донецк: Издание, 2009. 339 с.
- [17] Prucha J.J. Moody and Hill System of Wrench Fault Tectonics: discussion. *AAPG Bulletin*. 1964. Vol. 48(1). Pp. 106-111. DOI: <https://doi.org/10.1306/BC743BCF-16BE-11D7-8645000102C1865D>.
- [18] Старостенко В.И., Гинтов О.Б. Очерки геодинамики Украины: монография; под ред. акад. НАН Украины. Київ, 2018. 465 с.
- [19] Earth tide. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_tide (дата звернення 20.04.2025).
- [20] Асадов А.Р. Автоматизированный линеаментный анализ радарных снимков с применением программы LESSA (на примере Букантаусских гор). *So'ngi ilmiy tadqiqotlar nazariyasi*. 2023. Том 6, вип. 12. С. 239-245.

METHODOLOGICAL BASIS FOR THE OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF BOTTOM DEEPENING IN AQUATORIAL AND DRYLAND REGIONS

Naumenko A.	postgraduate student, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8025-2790 , e-mail: captainnaumenko@gmail.com ;
Kapochkina M.	PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4893-2523 , e-mail: kapochkinamargarita@gmail.com

The problem of choosing the optimal routes of navigable channels in areas of alluvial plains of land and areas of water areas with the accumulative relief of the seabed. The criterion for the selection of routes of navigable channels is to minimize the cost of dredging work at the canal construction stage. This is usually achieved by minimizing distance. The criterion for sketching the channel during operation is usually taken into account in the second place, because at the modern scientific and technical level the criteria for determining the sketching of the channels are not perfect. With the acquisition of new knowledge in the fields of fluid dynamics, the structure of the lithosphere was created a scientific basis for optimization, already taking into account the factor of slicing, projection of the route of the navigable canal. Thus, artificial intervention in natural processes through dredging, began to choose the features of ergonomics. An algorithm for lineament analysis of the structure formation of the earth's surface is proposed according to the hypothesis of K.F.

Tyapkin is proposed. As an example of implementing the algorithm for zoning the Earth's surface, including land and water area, a block division scheme for the southeastern part of Turkey is proposed. The algorithm for mapping the block division of the Earth's solid shell in a simplified version is implemented for the water area of the Dniester estuary, as a promising international waterway Dubosary – Bilhorod-Dniestrovskiy. The modern capabilities of pattern recognition software for automating the process of selecting the optimal route of a shipping channel based on the silting minimization criterion have been analyzed. The rotational hypothesis of structure formation has been improved. Using the example of the planetary activation of the structure formation process during the geodynamic epoch of 2005-2006, it is shown that a change in the azimuth of the action of destructive tidal geodeformations of the Earth's surface can occur under stable rotational conditions and without sudden changes in the inclination of the Earth's axis of rotation.

Keywords: navigation, maritime navigation, logistics, navigation channels, dredging work, siltation of navigable channels, fluidodinamica, structure of the lithosphere.

References

- [1] I.I. Hladkykh, M.B. Kapochkina, N.V. Kucherenko, and B.B. Kapochkin, *Nova paradyhma akumulatyvnoho reliefoutvorennia u milkovodnykh raionakh okeaniv ta moriv: monohrafiia* [A new paradigm of accumulative relief formation in shallow areas of oceans and seas: monograph]. Odesa, Ukraine: NU «OMA» Publ., 2021. (Ukr.)
- [2] I.I. Hladkykh, S.V. Symonenko, V.I. Mykhailov, N.V. Kucherenko, M.B. Kapochkina, *Perspektyvy rozvytku operatyvnoi okeanohrafii v Ukraini: monohrafiia* [Prospects for the development of operational oceanography in Ukraine: monograph]. Odesa, Ukraine: Astroprynt Publ., 2017. (Ukr.)
- [3] B. Kapochkin, N. Kucherenko, and M. Kapochkina, «Regularities in the transformation of coastal and accumulative forms of sea bottom relief, with application for water management», *Meteorology Hydrology and Water Management*, vol. 2(2), pp. 43-48, 2014. doi: 10.26491/mhwm/36422.
- [4] A. Kapochkin, B. Kapochkin, N. Kucherenko, and I. Uchytel, «Floods and droughts as a result of deformability of the geological environment», *Meteorology Hydrology and Water Management*, vol. 3(2), pp. 3-7, 2015. doi: 10.26491/mhwm/58810.
- [5] V.Y. Mykhailov, A.B. Kapochkina, and B.B. Kapochkin, *Vzaymodeistvie v systeme «Litosfera – hydrosfera»: monohrafiia* [Interaction in the system «Lithosphere – hydrosphere»: monograph]. Odesa, Ukraine: Astroprynt Publ., 2010. (Rus.)
- [6] A.V. Naumenko, and M.B. Kapochkina, «Teoriia i praktyka optymizatsii proektuvannia morskykh dnohybliuvalnykh robot u ruslakh richok» [«Theory and practice of optimization of design of marine works on dredging the bottom»], *Vodnyi transport – Water transport*, vol. 1 (42), pp. 210-226, 2025. doi: 10.33298/2226-8553.2025.1.42.24. (Ukr.)
- [7] A.V. Naumenko, and M.B. Kapochkina, «Teoriia i praktyka optymizatsii proektuvannia dnohybliuvalnykh robot u ruslakh richok» [«Theory and practice of optimization of design of dredging robots in the channels of the river»], *Vodnyi transport – Water transport*, vol. 2 (43), pp. 31-47, 2025. doi: 10.33298/2226-8553.2025.2.43.03. (Ukr.)
- [8] A.V. Naumenko, Ye.V. Kalinichenko, and M.B. Kapochkina, «Sposib vyznachennia mistia prokladannia trasy pidkhidnoho kanalu» [«Method for determining the location of the approach channel route»], *UA Patent 158155*, Jan. 08, 2025. (Ukr.)
- [9] V.M. Pererva, V.Y. Lialko, and P.F. Shpak, «Novie dannie o razlomno-blokovoi strukture severo-zapadnoho shelfa Chornoho moria po dannim aerokosmicheskikh yssledovaniy (v svyazy s neftehozoznostiu)» [«New data on the fault-block structure of the northwestern shelf of the Black Sea based on aerospace research (in connection with oil and gas potential)»], *Heolohicheskyi Zhurnal – Geological Journal*, № 4, pp. 78-84, 1994. (Rus.)
- [10] Pererva V.M., and V.Y. Lialko, «Ob endogennoi sostavliaiushchei v temperaturnoi dyfferentsyatsyy poverkhnosti Chernoho moria» [«On the endogenous component in the temperature differentiation of the Black Sea surface»], *Heolohicheskyi Zhurnal – Geological Journal*, № 3/4, pp. 123-128, 1996.
- [11] Y.L. Uchytel, and B.B. Kapochkin, *Smena paradyhmi sovremennoi heodynamiky y seismotektoniky: monohrafiia* [Paradigm shift in modern geodynamics and seismotectonics: monograph]. Lap LAMBERT Academic Publishing, 2014. (Rus.)
- [12] Y.L. Uchytel, V.S. Dorofeev, V.N. Yaroshenko, and B.B. Kapochkin, *Heodynamika. Osnovi dynamicheskoi heodezy: monohrafiia* [Geodynamics. Fundamentals of dynamic geodesy: monograph]. Odesa, Ukraine: Astroprynt Publ., 2008. (Rus.)
- [13] S.P. Voitenko, Y.L. Uchytel, V.N. Yaroshenko, B.B. Kapochkin, *Heodynamika. Osnovi kynematicheskoi heodezy: monohrafiia* [Geodynamics. Fundamentals of kinematic geodesy: monograph]. Odesa, Ukraine: Astroprynt Publ., 2008. (Rus.)
- [14] V.Y. Mykhailov, V.S. Dorofeev, V.N. Yaroshenko, B.B. Kapochkin, and N.V. Kucherenko, *Sovremennye izmeneniya urovnia Chernoho moria kak osnova strategii stroitel'nogo osvoeniya pribrezhyi: monohrafiia* [Modern Changes in the Black Sea Level as a Basis for the Strategy of Coastal Construction Development: Monograph]. Odesa, Ukraine: Astroprynt Publ., 2010. (Rus.)
- [15] K.F. Tiapkyn, «Bloky zemnoi kori s pozytsiyi novoi hipotezi strukturoobrazovaniya» [«Blocks of the Earth's Crust from the Position of the New Hypothesis

- of Structure Formation»], *Geologicheskii zhurnal – Geological journal*, № 4, pp. 10-20, 1993. (Rus.)
- [16] M.M. Dovbnych, and K.F. Tiapkyn, *Novaia rotatsionnaia hypoteza strukturoobrazovaniia y ee rol v razvytyi nauk o Zemle: uchebnyk* [New rotational hypothesis of structure formation and its role in the development of Earth sciences: textbook]. Donetsk, Ukraine: Yzdanye Publ., 2009. (Rus.)
- [17] J.J. Prucha, «Moody and Hill System of Wrench Fault Tectonics: discussion», *AAPG Bulletin*, vol. 48(1), pp. 106-111, 1964. doi: **10.1306/BC743BCF-16BE-11D7-8645000102C1865D**.
- [18] V.Y. Starostenko, and O.B. Hyntov, *Ocherky heodynamiyky Ukraini: monohrafiya* [Essays on Geodynamics of Ukraine: Monograph]. Kyiv, Ukraine, 2018. (Rus.)
- [19] Earth tide. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_tide. Accessed on: 20.04.2025.
- [20] A.R. Asadov, «Avtomatyzyrovannii lyneamentnii analiz radarnikh snymkov s prymerenyem prohrammi LESSA (na prymere Bukantavskikh hor)» [«Automated lineament analysis of radar images using the LESSA program (using the Bukantav Mountains as an example)»], *So'ngi ilmiy tadqiqotlar nazariyasi – Recent scientific research theory*, vol. 6, iss. 12, pp. 239-245, 2023. (Rus.)
- Стаття надійшла 05.05.2025
Стаття прийнята 08.06.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Науменко А.В., Капочкіна М.Б. Методичне підґрунтя оптимізації проєктування днопоглиблення в районах акваторій і суходолу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 264-276. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336447>.

**MODERN METHODS OF SCIENTIFIC RESEARCH IN THE SYSTEM OF TRAINING
SCIENTIFIC STAFF OF THE KHERSON STATE MARITIME ACADEMY****Gudyreva E.M.***PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-8555>, e-mail: gudelenal@gmail.com*

Research work is one of the most difficult types of independent work of applicants for the second level of higher education (master's students), the implementation of which requires special knowledge and skills. For master's cadets, preparing and writing a master's thesis is the first experience of research activity. In the Kherson State Maritime Academy, for master's cadets specializing in «Navigation and Management of Sea Vessels», the course «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» (MMSRDP) is provided, which, according to the curriculum and educational and professional program, is included in the cycle of professional training. The program of the academic discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» is drawn up in accordance with the Code of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers STCW-78, IMO-MODEL COURSE 7.01, 7.03. and according to EPP. The direction of our research is to improve the teaching of the course «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» in the Kherson State Maritime Academy to achieve more significant standards of professional competence of applicants for the second level of higher education (master's students) in the specialization «Navigation and Management of Marine Vessels» of KhSMA. This article examines two of the most important components of the MMSRDP course. The first is the «starting» knowledge of the methodology and methods of scientific research, namely, the most significant classical paradigms that determine the essence of the concepts of methodology and methods of scientific research, concepts and issues of modern methods of empirical and theoretical research. The second, no less important component of the MMSRDP course is the study by master's students of specific methods and techniques of data processing and analysis. Our further research is aimed at a more detailed consideration of the second component of the MMSRDP course - the study by master's students of specific methods and techniques of data processing and analysis in the field of technical sciences, in particular, in the field of navigation, which are most necessary for master's students of the navigation specialty, as well as the development of a set of individual tasks for master's students aimed at the application of specific methods and techniques of data collection and analysis.

Key words: scientific research, data processing, navigation, seamanship, competence.

Statement of the problem

Research work is one of the most difficult types of independent work of applicants for the second level of higher education (master's students), the implementation of which requires special knowledge and skills. For master's students, preparing and writing a master's thesis is the first experience in scientific research activities. Therefore, it is important to give them initial, «starting» knowledge about the methodology and methods of scientific research. It is necessary to explain that any scientific research begins with the formulation of clear goals of scientific research and asking questions that must be answered as a result of scientific research. This is the first, but basic step that determines the direction of all further work. The goals set before the start of scientific research determine the direction of the research and the choice of methods for collecting and analyzing experimental data. Only a clear understanding by a master's student of the research goals will enable him to determine what data is needed and in what volume, as well as how they should be organized for subsequent analysis. Understanding the goals of research by master's students is important for the successful completion of the research and obtaining meaningful final results.

The questions that a researcher (master's student) asks himself before starting work should be aimed at solving a specific problem or filling gaps in existing knowledge. A master's student should formulate questions in such a way that the answers to them are substantiated by the collected

data and measurable. This requires master's students to be able to identify specific subtopics from general voluminous topics that can be effectively research.

It is with the analysis and explanation of these most important concepts that the master's students of the specialization «Navigation and management of sea vessels» begin their study of the course «Modern methods of scientific research and data processing» (MMSRDP) at the Kherson State Maritime Academy (KhSMA).

All of the above allows us to draw a conclusion about the relevance of our research aimed at improving the teaching of the course «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» at the Kherson State Maritime Academy.

**Analysis of the latest achievements
on the identified problem**

The study included an analysis of scientific and methodological literature on mathematics, data analysis and processing, mathematical statistics, planning and processing of experimental results in engineering and science, both domestic and foreign authors [1-32]. Classical concepts and issues of modern methodology and methods of scientific research, modern methods of empirical and theoretical research, modern methods of data collection and analysis, specific methods and techniques of data collection and analysis were analyzed. Based on this analysis, the main concepts and issues were identified that we consider

basic when teaching the course MMSRDP and that cadets-masters of the navigation specialty need to know. A methodological approach to teaching the course «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» at the Kherson State Maritime Academy was determined. Ways for further improvement of teaching this course were outlined.

Purpose and task statement

Objective of the study: to determine the methodological approach to the formation of basic concepts of methodology and methods of scientific research in the course «Modern methods of scientific research and data processing» at the Kherson State Maritime Academy.

Objectives of the study:

- To analyze the place of the discipline SMNIOD in the system of training masters in the specialization «Navigation and Management of Marine Vessels» at KhSMA.
- To analyze classical concepts and issues of modern methodology and methods of scientific research and highlight the main ones that master's students in the specialization «Navigation and Management of Marine Vessels» at KhSMA need to know.
- To analyze classical concepts and issues of modern methods of empirical and theoretical research and highlight the main ones that master's students in the specialization «Navigation and Management of Sea Vessels» at KhSMA need to know.

Summary of the main material

Structure of the study

The first part of the study examines the place of the discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» (MMSRDP) in the system of training masters in the specialization «Navigation and Management of Sea Vessels» at the Kherson State Maritime Academy, the goals, objectives and content of the discipline.

The second part of the study is devoted to the consideration of the first of the two most important components of the MMSRDP course – «starting» knowledge about the methodology and methods of scientific research: are being considered the most significant classical paradigms are considered, defining the essence of the concepts of methodology and methods of scientific research, which must be known by master's students of the navigation specialty, and the concepts and issues of modern methods of empirical and theoretical research are also considered.

The third part of the study is devoted to the consideration of the second of the two most important components of the MMSRDP course – specific methods and techniques for processing and analyzing data.

1. MMSRDP in the system of training master's of navigation at KhSMA.

The discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» according to the curriculum

and educational and professional program is included in the cycle of professional training.

The program of the academic discipline «Modern methods of scientific research and data processing» is compiled in accordance with the Code of training, certification and watchkeeping for seafarers STCW-78, IMO-MODEL COURSE 7.01, 7.03. [33-35] and in accordance with the Educational professional program (EPP) KhSMA.

The knowledge, skills and abilities obtained as a result of studying the discipline allow you to competently and professionally write the final master's thesis and continue your studies in graduate school.

The discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» is closely related to the following disciplines and their modules:

1. *Mathematics*. Trigonometry, elementary algebra, elementary geometry (plane geometry, stereometry), numerical methods, computational mathematics.

2. *Mathematical statistics and theoretical foundations of navigation*. Methods and techniques for processing statistical information, principles of testing statistical hypotheses. Their application to substantiate navigation methods for determining the vessel's position and assessing its accuracy.

3. *Physics*. Physical phenomena that form the basis of the operating principle of navigational instruments and ship mechanisms. Basic mathematical relationships that describe the principles of their operation.

4. *Navigation and information systems*. Electronic navigation methods for determining the vessel's position, the vessel's location using: coastal landmarks, navigation aids, dead reckoning taking into account winds, tides, currents and calculated speed. Evaluation of the accuracy of the vessel's dead reckoned and observed position.

5. *Computer science*. Universal computer systems for information processing, in particular Excel, as a means of solving problems of mathematical statistics and data processing in navigation.

The study of the academic discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» is aimed at formation the following competencies:

The purpose of studying the discipline is to prepare masters of the specialization «Navigation and management of sea vessels» to write a master's dissertation, scientific papers and, subsequently, to carry out scientific work in the field of navigation.

Objectives of the discipline:

— to familiarize master's students in the specialization «Navigation and Management of Sea Vessels» with modern methodology and methods of scientific research; with modern methods of experimental research; with modern methods of data processing and analysis;

— to form the skills of master's students specializing in «Navigation and Management of Sea Vessels» in using modern methods of experimental research and modern methods of data processing and analysis.

Table 1

Competence requirements for the skills of specialists in accordance with the EPP and STCW with amendments

Competence	Program learning outcomes
OK02. The ability to acquire specialized conceptual knowledge at the level of the latest achievements, which is the basis for original thinking, particularly in the context of research work.	PR02. Specialized conceptual knowledge at the cutting-edge level that serves as the basis for original thinking and innovative activity, including in the context of research work.
OK03. Ability to critically understand problems when conducting research at the intersection of subject areas.	PR03. Ability to critically understand problems when conducting research and/or in professional activities and at the intersection of subject areas.
OK04. Ability to implement innovative and research activities, communication with representatives of other professional groups of different levels of the international context (with experts from other fields of knowledge/types of economic activity)	PR07. Ability to use information and communication technologies to search, process and analyze information. PR09. Ability to prepare and present scientific and technical reports, reviews, publications (scientific articles and theses) based on the results of completed research using modern editing and printing tools in accordance with established requirements.

Source: EPP of discipline (2024) and STCW with amendments [33]

The goals and objectives of the course «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» for masters of the specialization «Navigation and Management of Marine Vessels» determined the content of the discipline.

2. «Starting» knowledge about the methodology and methods of scientific research.

Based on the importance of master's students mastering the basic concepts of methodology and methods of scientific research, methods of empirical and theoretical research for the effective conduct of scientific research work, after conducting an analysis of classical concepts and questions in these areas of knowledge, we identified the main ones for presentation in the MMSRDP course [1-32].

1. Methodology of scientific research.

The most common philosophical interpretation of the term «methodology» is that methodology is considered as a philosophical doctrine about the methods of cognition of the ways in which a person transforms reality.

Methodology has two main functions:

- obtaining new knowledge and presenting this knowledge through concepts, criteria, laws, theories, hypotheses;

- organizing the application of new knowledge in practical activities.

The task of methodology is to clarify, transform and construct patterns of human activity that are integrated into everyday human experience.

Methodological research is divided into general, particular and specific:

1. *General methodology of science* studies the problems of substantiation of scientific knowledge regardless of which of the specific scientific disciplines it was obtained in. Its main tasks are:

- study of universal operations of scientific knowledge (explanation and understanding) and methods of substantiating scientific knowledge;

- analysis of criteria for the acceptability of systems of scientific theories;

- study of systems of categories used as the basis of scientific thinking;

- problems of the unity of scientific knowledge.

2. *The private methodology of science* studies the methodological problems of individual sciences or their narrow groups.

A characteristic feature of any private methodology is that, while it is important for some individual science or narrow group of sciences, it is of almost no interest to other disciplines.

For example, the methodology of navigational sciences, the methodology of ecology, the methodology of physics, etc. Each of them uses the operation of explanation, but these explanations use the concept of purpose, which loses its meaning when applied to objects of another subject area.

3. *The specific methodology of science*, sometimes called methodics, studies the methodological aspects associated with individual operations within specific scientific disciplines.

The sphere of this methodology, which varies from science to science, includes, for example, the methodics for conducting an experiment in navigation, the methodics for conducting an experiment in studying the degree of environmental pollution, the methodics for conducting a physical experiment, etc.

Intradisciplinary methods of theoretical and empirical research, including the methodology of specific studies, are, for the most part, highly specialized practices.

The methodology of science undergoes natural changes over time, associated with the orientation toward the real practice of scientific and cognitive activity and overcoming inertia in the selection of models and schemes of scientific knowledge.

At present, the most important task of methodology is the awareness and corresponding constructive reorientation to the problems of natural science, technical and humanitarian scientific knowledge, the transition from the purely objective consideration of scientific subject matter,

characteristic of the classical approach, to such consideration that takes into account the «human» and/or «natural» factors.

2. Methods of scientific research.

It is necessary to distinguish between the concepts of «methodology» and «method». Method is a way of organizing practical and theoretical development of reality, conditioned by the patterns of development of the object. The final result of scientific research depends on whether the young researcher has realized the research method or not, and has managed to select the necessary methods.

Scientific research is a creative process, there are no predetermined methods of cognition, however, the content of the methods is not formed arbitrarily by the researcher.

The method of scientific research is determined through the practical interaction of the subject of the research (research scientist) with the object of the research. For the effective use of the method, the subject is necessary objective knowledge about the object of the research. Such knowledge is accumulated in scientific theories, so their use fills the method with ideas, principles and approaches.

Thus, the method becomes the element of scientific research around which theory, practice, subject and object are united.

The modern system of scientific methods is diverse. All methods, depending on whether they can be applied in a narrow or broader scientific field, are divided into three main groups: general philosophical, general scientific and specifically scientific methods. But despite belonging to one or another group, in the process of research, the methods interact, complement each other, and are aimed at obtaining new knowledge.

The most frequently used general scientific methods in the practice of scientific research are *analysis*, *synthesis*, *induction*, *deduction*, *analogy* and *modeling*.

Analysis is a research method that breaks down the subject of the study into its component parts. Each of these parts is studied separately. This method makes it possible to cover a large number of facts at the same time, identifying possible connections.

Synthesis is a research method that is opposite to analysis; it is the integration of the results of the analysis into a whole, creating a common system. It establishes connections between the parts and makes it possible to understand the object of the study as a whole.

The methods of analysis and synthesis are interconnected. In scientific research, they are usually used simultaneously (sometimes analysis is called descending analysis, and synthesis is called ascending analysis).

Deduction is a research method in which particulars are derived from general provisions («from the general to the particular»). It allows one to draw conclusions about a certain element of a set based on knowledge of the general properties of the entire set.

Induction is a research method in which general principles and patterns are derived from particular facts and phenomena («from the particular to the general»).

The induction method is especially effective in experimental studies with the collection of empirical facts. The researcher establishes phenomena that are recurring in nature and can, by generalizing empirical data, make an assumption about the cause of the phenomena under study. Thus, the researcher makes an inductive conclusion (puts forward a hypothesis), and deduction theoretically proves this conclusion, turning the hypothesis into reliable knowledge.

Analogy is a research method in which knowledge about some objects or phenomena is transferred to other objects or phenomena based on their similarity in essential properties and qualities.

Modeling is a research method in which the object or phenomenon being studied is replaced by its model. The model should reflect the essential characteristics of the real object of study. The characteristics of the original are determined or clarified by the model.

Modeling is actively used in both theoretical and empirical research.

Modeling is considered to be a fairly effective means of predicting the influence of external factors on the phenomenon being studied and making specific decisions.

In our opinion, special attention should be paid to the methods of empirical and theoretical research.

3. Specific methods and techniques for processing and analyzing data.

Scientific research can be conducted at the empirical or theoretical level using the appropriate methods. They rely on the general and, especially, on the private and specific methodology of science.

Each of these levels has its own specific type of research: empirical and theoretical research. Empirical and theoretical research are aimed at studying the same phenomenon, but the results of the research will be different. At the theoretical level, a scientific explanation of the facts obtained at the empirical level occurs. These levels are inseparable from each other, their unity allows achieving objectivity in scientific research.

Empirical scientific research is necessarily based on certain theoretical positions. Their results are systematized and presented from the position of certain theoretical statements.

Theoretical research is based on structural elements: scientific idea, hypothesis, theory, facts, categories, axioms, etc. A clear and distinct understanding of these structural elements enables the researcher to conduct a more precise argumentation or proof of certain theoretical positions.

Theory is a holistic representation of scientific knowledge about the patterns and essential connections of reality.

Categories are the most general and fundamental concepts that reflect the essential connections of reality.

Scientific idea is an intuitive explanation of a phenomenon without intermediate argumentation and awareness of the entire set of connections between the objects of research or its constituent elements.

Hypothesis is a prediction of the cause that causes the consequence.

Facts are a set of knowledge about an object or phenomenon, the reliability of which has been proven.

Axioms are provisions accepted without proof.

Postulates are statements accepted within the framework of any scientific theory as truth that does not require proof (axioms within this theory).

Principles are the basic initial provisions of any theory, science or worldview.

Concept is an opinion in which objects of a certain class (type) are generalized and isolated according to certain common features.

Proposition is an opinion formulated in the form of a scientific statement.

Judgment is an opinion expressed in the form of a narrative sentence, about which it can be said whether it is true or false.

Laws are stable relationships between recurring phenomena in nature and society.

Methods of empirical and theoretical research

Based on the importance of master's students acquiring not only basic knowledge about modern methods of data collection and analysis, but also mastering specific methods and techniques of data collection and analysis used in the field of technical sciences, in particular, in the field of navigation, after analyzing classical methods and techniques in these areas of knowledge, we have identified the main ones for presentation in the MMSRDP course.

In the process of preparing a master's thesis, one of the key stages is data collection and analysis. Data processing (analysis) methods are critically important for any scientific research. Correctly selected methods of data collection and subsequent processing directly affect the research results and increase the likelihood of obtaining accurate and reliable results.

One of the tools for analyzing experimental data and observations conducted by the researcher, as well as the language by which the obtained mathematical results are communicated, is mathematical statistics. The mathematical apparatus is widely used in solving classification problems and searching for new patterns, for setting new scientific hypotheses.

The use of mathematical and statistical techniques for processing and analyzing data in modern scientific research is based on the researcher's knowledge of the basic methods and stages of mathematical and statistical analysis: their sequence, necessity and sufficiency.

It is necessary to show novice researchers that understanding the essence and rules of application of methods is primary, and the choice of formulas and calculations carried out on them is secondary.

Statistical processing of research results is based on the sampling method and its principle: if a certain statement is true for a random sample, then it is also true for the general population from which this sample was obtained.

It is important for master's students to understand that the value of a certain parameter for the entire population

(mean value, median, dispersion, etc.) is, in most cases, impossible to obtain (an exception is conducting a study on a group that includes all elements of the population). However, this value of the parameter can be estimated from a sample. The accuracy of such an estimate depends on the measurement method (measurement error) and the size and representativeness of the sample (sampling error).

Of course, a random sample from the general population must be representative. Representativeness of the sample is one of the pressing issues, the successful solution of which determines the reliability of the conclusions obtained during statistical processing of research results.

Representativeness of the sample is the completeness and adequacy of its representation of the properties of the general population.

A sample is **representative** if its probability characteristics coincide with or approach the corresponding characteristics of the general population within the specified permissible error.

The sample will be representative if:

- the probability of inclusion in the sample for each element of the general population is the same;
- the sample size ensures the required accuracy of the characteristics of the general population.

The minimum size n of the repeated sample is determined by the formula:

$$n_{\min} = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{(\Delta x)^2},$$

where Δx – the specified permissible absolute error in determining the arithmetic mean;

σ – sample standard deviation;

t – the confidence coefficient, which depends on the confidence probability with which the results of the sample study must be guaranteed.

The units of measurement of the values σ and Δ must be the same.

To calculate t , the Excel function $T.INV(1-\alpha, n-1)$ is used, where α is the significance level, n is the sample size.

When choosing a specific method and technique for processing and analyzing data, they rely, first of all, on the type of data (data classification) and, in accordance with it, as well as the goals and objectives of the study, the analysis criterion is selected.

The first stage of data analysis - classification

The use of mathematical apparatus for processing the results of scientific research, solving classification problems, searching for new patterns, and formulating new scientific hypotheses is possible only for what can be measured.

Measurement is the assignment of numbers to objects or events based on a certain system of rules.

Data classification is the determination of their type according to the corresponding measurement scale (data is measured on a numerical or non-numerical scale).

There are different types of measurement scales, but they are usually interconnected [4-8, 11, 22-32].

The most commonly used gradation is:

- scale of classification (of names, nominal);
- scale of order;
- scale of intervals;
- scale of relationship.

Sometimes they also talk about discrete and continuous measurement scales, classifying the classification scale and order scale as discrete. Since these scales do not have intermediate values, they are often called non-quantitative, qualitative. Continuous measurement scales include interval scale and ratio scale. They are called quantitative (metric) scales.

Scale of classification (of names, nominal). No comparison operations other than «equal» and «not equal» are possible. Numbering or naming serves only to identify the object. For example, by vessel type: 1 – river vessels, 2 – sea and ocean vessels, 3 – river-sea vessels.

Scale of order. It is possible to compare objects by size – «greater», «less», «equal». Other operations are impossible. Values set by different specialists may not coincide (scale shift). For example, comparison of ships by tonnage: 1 – small ships, 2 – medium ships, 3 – large ships; or the scale of stellar magnitudes – a measure of the brightness of a celestial body from the point of view of an observer on Earth: the brighter the object, the smaller its stellar magnitude.

It is possible to compare the degree of expression of a classification feature. For example, when describing the results «before» and «after» some influence and the researcher sees trends in repeated measurements, or to assess the differences in experimental data obtained under two different conditions for the same sample.

Scale of interval. This scale allows not only comparison by magnitude, but also determination of «how much

more» (i.e., «addition» and «subtraction» operations). Relative data have the properties of interval data. In addition, they have a certain absolute zero point (the value from which other values are counted). For example, temperature scales (Celsius, Kelvin, Fahrenheit, Reaumur).

Scale of relationship. This scale has a natural starting point and all operations are allowed: «comparison», «addition» and «subtraction», «multiplication» and «division», that is, it is possible to clarify the questions «how many times» and «how much more». For example, weight, length, etc.

In the process of development of science and measuring instruments, it is possible to move from one scale of measurements to another, more advanced one, for example, the first thermometers measured temperature in a scale of order («moderate», «warm», «hot», etc.).

The scale of measurement imposes restrictions on the statistical characteristics that can be calculated for a random variable measured in a specific scale, and on the methods of data analysis that can be correctly applied to them (Tables 2, 3).

The second stage of data analysis – the choice of the analysis criterion

In data analysis, the concept of a random variable is widely used as a value that, as a result of a test/experiment, takes on a value that is previously unknown and depends on random causes.

If, as a result of each study, a random variable corresponds to only one number, then it is called one-dimensional or **scalar**. If, as a result of each study, a random variable corresponds to several numbers that characterize different properties of an object, then it is called multidimensional or **vector**.

Table 2

Possible operations and statistical characteristics of measurement scales

Scale name	Scale type	Operations	Statistical characteristics that can be calculated
Classifications	Discrete	=, ≠	Frequencies, modal class
Order	Discrete	=, ≠, >, <	Frequencies, mode, median, rank correlation
Interval	Continuous	=, ≠, >, <, +, -	Frequencies, mode, median, rank correlation, mean, variance
Relationships	Continuous	=, ≠, >, <, +, -, /, *	All available

Table 3

Relationship between measurement scales and applied data analysis methods

Scale of measurement of influencing variables	Scale of measurement of dependent variables	Applied methods of data analysis
Intervals or relations	Intervals or relations	Regression and correlation analysis
Time	Intervals or relations	Time series analysis
Names or order	Intervals or relations	Analysis of variance (If the number of factors is more than two, it is more convenient to use regression analysis)
Mixed	Intervals or relations	Covariance and regression analysis
Names or order	Names or orders	Analysis of rank corrections and contingency tables (For multi-cell contingency tables, regression analysis can be used)
Names or order	Intervals or relations	Discriminant analysis, cluster analysis, taxonomy

The values of a vector random variable are divided into **independent** (factorial) and **dependent** (resulting). Dependent variables are considered as a result of external influences on the object of study. The external influences themselves are expressed by independent variables.

The simplest task of data analysis is the task when the influence of one independent factor on the variable under study is assessed (single-factor analysis).

To analyze the obtained experimental data, correlation and regression analyses are used, which are often combined into one method of correlation-regression analysis.

Correlation analysis. Useful at the preliminary stage of data processing, allows you to determine the degree of strength of the relationship between two or more random variables (factors).

Regression analysis. Solves the main problem of the experiment, establishes the structure and parameters of the model linking quantitative indicators: the resulting and factor variables.

Before choosing a criterion for data analysis, it is necessary to determine the type of distribution law: whether the distribution law is normal or not. Most often, the Pearson criterion is used to test the hypothesis about the distribution law. An example of using the Pearson criterion is given below.

Depending on the type of data, the type of distribution and additional conditions, the principle (criterion) of statistical data processing is selected: parametric or nonparametric.

The parametric principle includes all methods of analyzing normally distributed quantitative features, that is, measured in continuous scales: intervals, ratios (in metric scales).

The nonparametric principle is used in all other cases – for analyzing quantitative features regardless of their type of distribution and for analyzing qualitative features.

For normally distributed features, parametric and nonparametric methods give similar results.

Example of using the Pearson criterion. Check whether the distribution of the general population is normal. Perform the check at a significance level of 0.05 for the empirical distribution of the sample:

Table 4

Sample data									
X_i	5	7	9	11	13	15	17	19	21
n_i	15	26	25	30	26	21	24	20	13

Solution. To check whether the general population is normally distributed or not, we use the Pearson criterion.

The empirical distribution of the sample of the general population is given as a sequence of equally spaced variants and their corresponding frequencies, therefore we apply the algorithm:

1. Formulate hypotheses.

Null hypothesis: H_0 : the general population is normally distributed.

Alternative hypothesis: H_1 : the general population is not normal.

2. Calculate the sample size $n = 200$, the sample mean $\bar{X}_{sel} = 12,63$ and the sample standard deviation $\sigma_{sel} = 4,695$.

3. Calculate the theoretical frequencies n'_i ($n=200$ - sample size; $h = x_{i+1} - x_i = 2$ - table step):

Table 5

Calculation of theoretical frequencies

x_i	$u_i = \frac{x_i - \bar{X}_{sel}}{\sigma_{sel}}$	$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}}$	$n'_i = \frac{n \cdot h}{\sigma_{sel}} \cdot \varphi(u_i)$
5	-1,62513	0,106515	9,1
7	-1,19915	0,194385	16,6
9	-0,77316	0,295872	25,2
11	-0,34718	0,37561	32,0
13	0,078807	0,397705	33,9
15	0,504792	0,351219	29,9
17	0,930777	0,258693	22,0
19	1,356763	0,158922	13,5
21	1,782748	0,081428	6,9

4. Find the observed value of the Pearson criterion

$$\chi^2_{obs} = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \text{ (make a calculation table):}$$

Table 6

Calculation table

n_i	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
15	5,9	35,10824	3,86877
26	9,4	89,09492	5,379806
25	-0,2	0,043013	0,001706
30	-2,0	4,0033	0,1251
26	-7,9	62,14661	1,834136
21	-8,9	79,61611	2,660718
24	2,0	3,841978	0,174319
20	6,5	41,73556	3,082459
13	6,1	36,75459	5,298001

$$\chi^2_{obs} = 22,4$$

5. Determine the number of degrees of freedom: $k = 9 - 3 = 6$.

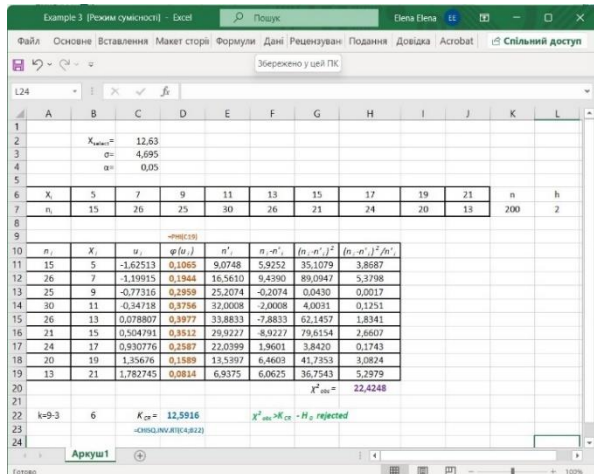
6. The significance level for the condition $\alpha = 0.05$.

7. Find the critical value of the Pearson criterion $\chi^2_{cr}(\alpha; k)$ – the right-hand critical region for the significance level and the number of degrees of freedom according to the χ^2 distribution table (Appendix 5):

$$\chi^2_{cr}(\alpha; k) = 12,6.$$

8. Compare the observed and critical values of the Pearson criterion: $\chi^2_{obs}(\alpha; k) > \chi^2_{cr}(\alpha; k)$, which means we reject the null hypothesis. Consequently, the distribution of the general population is not normal.

Solution in Excel:



n	X	s	u	u'	n-u'	(n-u')^2	(n-u')^2/n
15	5	-1.62513	0.1065	9.0748	5.9252	35.1079	3.8687
26	7	-1.19915	0.1944	16.5610	9.2390	89.0947	5.3798
25	9	-0.77316	0.2959	25.2074	-0.2074	0.0430	0.0017
30	11	-0.34718	0.3756	32.0008	-2.0008	4.0031	0.1251
26	13	0.078807	0.3977	33.8833	-7.8833	62.1457	1.8341
21	15	0.504791	0.3512	29.9227	-8.9227	79.6154	2.6607
24	17	0.930776	0.2587	22.0399	-1.9601	3.8420	0.1743
20	19	1.35676	0.1589	13.5397	6.4603	41.7353	3.0824
13	21	1.782745	0.0814	6.9375	6.0625	36.7543	5.2979
							22.4248

$K_{\alpha} = 12.5916$
 $\chi^2_{obs} > K_{\alpha} \rightarrow H_0 \text{ rejected}$

Conclusions

During the conducted research, a methodological approach to improving the teaching of the course «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» at the Kherson State Maritime Academy was determined. Namely, during the study, classical concepts and issues of modern methodology and methods of scientific research, modern methods of empirical and theoretical research, modern methods of data collection and analysis, specific methods and techniques of data collection and analysis were analyzed. As a result of the analysis, the main concepts and issues were identified, which we consider basic when teaching the course MMSRDP and which must be known by master's cadets of the navigation specialty.

The tasks set before the beginning of the study were completed, the goal of the study was achieved.

Studying the discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» provides applicants for the second level of higher education (Masters) with basic knowledge of the methodology, methods and organization of scientific activity to ensure their professional socialization as researchers.

In addition, studying the discipline «Modern Methods of Scientific Research and Data Processing» by Masters students provides them with the opportunity to correctly select the methods of collecting and analyzing data for the relevant application area.

Correct application of the studied methods and techniques of collecting and analyzing data allows Masters students to:

- prove the correctness and validity of the methodological techniques and methods used;
- strictly justify experimental plans;
- generalize experimental data.

The content of the MMSRDP course is a powerful tool for master's students, contributing to the development of their objective thinking. We see prospects for further study of the stated problem, firstly, in a more detailed study of the specifics of studying by master's students of those specific methods and techniques of data processing and analysis that are used in the field of technical sciences, in particular, in the field of navigation, and are most necessary for master's students in the navigation specialty. Secondly, in the need to develop a set of individual tasks for master's students aimed at applying specific methods and techniques of data collection and analysis.

References

- [1] S. Bekesiene, O. Nakonechnyi, O. Kapustian, I. Shevchuk, and M. Loseva, «Dynamics analysis and forecast of number of individuals with stress syndrome under uncertainties», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*, № 2, pp. 195-199, 2023. doi: 10.17721/1812-5409.2023/2.35.
- [2] L.D. Brown, T.T. Cai, and A. Dasgupta, «Interval estimation for a binomial proportion», *Statistical science*, no. 2, pp. 101-133, 2001. doi: 10.1214/ss/1009213286.
- [3] N.R. Draper, and H. Smith, «Applied Regression Analysis», in *Wiley Series in Probability and Statistics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1998, 736 p. doi: 10.1002/9781118625590.
- [4] J.É. Figueira, S. Greco, and M. Ehrogott, «Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys», in *International Series in Operations Research & Management Science (ISOR)*, Springer New York, 2005, vol. 78, 1048 p. doi: 10.1007/b100605.
- [5] M.A. Garcia-Perez, «On the confidence interval for the binomial parameter», *Quality and quantity*, no. 39, pp. 467-481, 2005. doi: 10.1007/s11135-005-0233-3.
- [6] J.F. Gary, and D.C. Robert, «A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals», *Physical Review D*, vol. 57, pp. 3873-3889, 1998. doi: 10.1103/physrevd.57.3873.
- [7] B.P. Harrison, Probability and statistical inference: Lectures given at the SERC School in Particle Physics, Chandigarh, India, 7-27 March 2005, arXiv:physics/0606179v1. doi: 10.48550/arXiv.physics/0606179.
- [8] M. Leimeister, and A. Kolios, «A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1065-1076, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.004.
- [9] R. Maiboroda, V. Miroshnychenko, and O. Sugakova, «Quantile estimators for regression errors in mixture models with varying concentrations», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*, № 78(1), pp. 45-50, 2024. doi: 10.17721/1812-5409.2024/1.8.

- [10] R.E. Maiboroda, and O.V. Sugakova, «Tests of hypotheses on quantiles of distributions of components in a mixture», *Theory of Probability and Mathematical Statistics*, № 101, pp. 179-191, 2020. doi: **10.1090/tpms/1120**.
- [11] M. Rausand, A. Barros, and A. Hoyland, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Application*, 3-d ed. John Wiley & Sons, Inc., 2021. doi: **10.1002/9781119373940**.
- [12] R.L. Mason, R.F. Gunst, and J.L. Hess, *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science*, 2-d ed., A John Wiley & Sons Publication, 2003. doi: **10.1002/0471458503**.
- [13] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2022.
- [14] J. Neyman, «Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, vol. 236, pp. 333-380, 1937. doi: **10.1098/rsta.1937.0005**.
- [15] J.B. Roger, «Event classification using weighting methods», *Journal of Computational Physics*, vol. 72, pp. 202-219, 1987. doi: **10.1016/0021-9991(87)90078-7**.
- [16] D. Simonov, and V. Gorbachuk, «A method of finding solutions in a dynamic model of inventory management under uncertainty», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*, № 4, pp. 31-39, 2022. doi: **10.17721/1812-5409.2022/4.4**.
- [17] A. Spriestersbach, B. Röhrig, J.-B. du Prel, A. Gerhold-Ay, and M. Blettner, «Descriptive Statistics The Specification of Statistical Measures and Their Presentation in Tables and Graphs. Part 7 of a Series on Evaluation of Scientific Publications», *Deutsches Ärzteblatt international*, no. 106, pp. 578-583, 2009. doi: **10.3238/arztebl.2009.0578**.
- [18] V. Zubchenko, and M. Herasymenko, «Analysis of the impact of macroeconomic indicators on the country's rating», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*, № 78(1), pp. 36-40, 2024. doi: **10.17721/1812-5409.2024/1.6**.
- [19] V.P. Zubchenko, and P.V. Aleksandrova, «Mathematical modeling of the dynamics of an insurance company based on macro indicators», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*, № 1, pp. 44-47, 2023. doi: **10.17721/1812-5409.2023/1.6**.
- [20] V.P. Zubchenko, and A.V. Tkachenko, «Mathematical model of financial dynamics of an insurance company», *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*, № 3, pp. 28-36, 2022. doi: **10.17721/1812-5409.2022/3.3**.
- [21] V.Ie. Bakhrushyn, *Metody analizu danykh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv* [Data Analysis Methods: A Study Guide for Students]. Zaporizhzhia, Ukraine: KPU Publ., 2011. (Ukr.)
- [22] V.F. Bosniuk, *Matematychni metody v psykholohii: kurs lektsii* [Mathematical methods in psychology: a course of lectures]. Kharkiv, Ukraine: NUTsZU, 2020. (Ukr.)
- [23] P.M. Hrytsiuk, and O.P. Ostapchuk, *Analiz danykh: Navchalnyi posibnyk* [Data Analysis: A Tutorial]. Rivne, Ukraine: NUVHP Publ., 2008. (Ukr.)
- [24] S.M. Iehorova, «Pro osoblyvosti vprovadzhenia zasad kompetentnisono pidkhotu u vyshchu profesiinu osvitu fakhivtsiv morskoho transportu» [«On the peculiarities of implementing the principles of the competency-based approach in higher professional education of maritime transport specialists»]. *Modern Problems and ways of their solution in science, transport and education*, 2014, pp. 151. (Ukr.)
- [25] Y. Yeleyko, O. Yarova, and S. Holovaty, «Pobudova statystychnykh kryteriiv z urakhuvanniam vplyvu zovnishnogo seredovyshcha» [«Construction of statistical criteria taking into account the influence of the extremal environment»], *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii mekhaniko-matematychna – Visnyk of the Lviv University. Series Mechanics and Mathematics*, vol. 91, pp. 99-104, 2021. doi: **10.30970/vmm.2021.91.099-104**. (Ukr.)
- [26] V.I. Zhluktenko, S.I. Nakonechnyi, and S.S. Savina, *Teoriia ymovirnostei i matematychna statystyka* [Probability theory and mathematical statistics]. Kyiv, Ukraine: KNEU Publ., 2001. (Ukr.)
- [27] P.O. Ivashchenko, I.V. Semeniak, and V.V. Ivanov, *Bahatovymirnyi statystychnyi analiz* [Multivariate statistical analysis]. Kharkiv, Ukraine: Osnova Publ., 1992. (Ukr.)
- [28] S.N. Lapach, A.V. Chubenko, and P.N. Babysh, *Statystyka v nauke y byznese* [Statistics in Science and Business]. Kyiv, Ukraine: MORYON Publ., 2002. (Ukr.)
- [29] R.Ie. Maiboroda, *Rehresiia: Liniini modeli: navchalnyi posibnyk* [Regression: Linear Models: Tutorial]. Kyiv, Ukraine: VPTs «Kyivskyi universytet» Publ., 2007. (Ukr.)
- [30] V.I. Paniotto, V.S. Maksymenko, and N.M. Kharchenko, *Statystychnyi analiz sotsiologichnykh danykh* [Statistical analysis of sociological data]. Kyiv, Ukraine: «KM Academy» Publ., 2004. (Ukr.)
- [31] A.O. Pashko, *Statystychnyi analiz danykh* [Statistical data analysis]. 2019. 55 c.
- [32] V.M. Rudenko, *Matematychna statystyka: navchalnyi posibnyk* [Mathematical statistics: a textbook]. Kyiv, Ukraine: Tsentr uchbovoi literatury Publ., 2012. (Ukr.)
- [33] *Mizhnarodna konventsiiia pro pidhotovku i dyplovuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 roku* [International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978]. 55 p.
- [34] IMO Model Course 7.03. Officer in charge of a navigational watch. Sub-committee on standards of training and watchkeeping. STW 44/WP.6/Add.1.
- [35] IMO Model Course 7.01. Master and chief mate. 2014 Edition. Electronic Edition. STW 43/3/6.

СУЧАСНІ МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ
НАУКОВИХ КАДРІВ ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Гудирева О.М.

канд. фіз.-мат. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-8555>, e-mail: gudelenal@gmail.com

Науково-дослідна робота – один із найскладніших видів самостійної роботи здобувачів другого рівня вищої освіти (курсантів-магістрів), здійснення якої потребує спеціальних знань та умінь. Для курсантів-магістрів підготовка та написання магістерської роботи – перший досвід науково-дослідної діяльності. У Херсонській державній морській академії для курсантів-магістрів спеціалізації «Навігація та управління морськими судами» передбачено вивчення курсу «Сучасні методи наукових досліджень та обробки даних» (СМНДОД), який за навчальним планом та освітньо-професійною програмою входить до циклу професійної підготовки. Програма навчальної дисципліни «Сучасні методи наукових досліджень та обробки даних» складена відповідно до Кодексу підготовки та дипломування моряків та несення вахти ПДМНВ-78, IMO-MODEL COURSE 7.01, 7.03. та згідно з ОПП. Напрямок наших досліджень є вдосконалення викладання курсу «Сучасні методи наукових досліджень та обробки даних» у Херсонській державній морській академії для досягнення більш значущих стандартів професійної компетентності здобувачів другого рівня вищої освіти (курсантів-магістрів) спеціалізації «Навігація та управління морськими судами» ХДМА. У цій статті розглядаються дві найважливіші складові курсу СМНДОД. Перша – це «стартові» знання про методологію та методи наукового дослідження, а саме, найбільш значущі класичні парадигми, що визначають суть понять методологія та методи наукового дослідження, поняття та питання сучасних методів емпіричного та теоретичного досліджень. Друга, не менш важлива складова курсу СМНДОД – це вивчення курсантами-магістрами конкретних методів та прийомів обробки та аналізу даних. Подальші наші дослідження спрямовані на більш детальний розгляд другої складової курсу СМНДОД – на вивчення курсантами-магістрами конкретних методів і прийомів обробки та аналізу даних у галузі технічних наук, зокрема, у сфері судноводіння, які найбільш необхідні курсантам-магістрам судноводійської спеціальності, а також розробці набору індивідуальних завдань на конкретних методів збору та аналізу даних.

Ключові слова: наукові дослідження, обробка даних, навігація, судноводіння, компетентність.

Перелік використаних джерел

- [1] Dynamics analysis and forecast of number of individuals with stress syndrome under uncertainties / S. Bekesiene et al. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*. 2023. № 2. Pp. 195-199. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.35>.
- [2] Brown L.D., Cai T.T., Dasgupta A. Interval estimation for a binomial proportion. *Statistical science*. 2001. No 2. Pp. 101-133. DOI: <https://doi.org/10.1214/ss/1009213286>.
- [3] Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis. Wiley Series in Probability and Statistics*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998. 736 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118625590>.
- [4] Figueira J.É., Greco S., Ehrogott M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. *International Series in Operations Research & Management Science (ISOR)*. Springer New York, 2005. Vol. 78. 1048 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/b100605>.
- [5] Garcia-Perez M.A. On the confidence interval for the binomial parameter. *Quality and quantity*. 2005. No. 39. Pp. 467-481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11135-005-0233-3>.
- [6] Gary J.F., Robert D.C. A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals. *Physical Review D*. 1998. Vol. 57. Pp. 3873-3889. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevd.57.3873>.
- [7] Harrison B.P. Probability and statistical inference: Lectures given at the SERC School in Particle Physics, Chandigarh, India, 7-27 March 2005. 53 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0606179>.
- [8] Leimeister M., Kolios A. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. Pp. 1065-1076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>.
- [9] Maiboroda R., Miroshnychenko V., Sugakova O. Quantile estimators for regression errors in mixture models with varying concentrations. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*. 2024. № 78(1). Pp. 45-50. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2024/1.8>.
- [10] Maiboroda R.E., Sugakova O.V. Tests of hypotheses on quantiles of distributions of components in a mixture. *Theory of Probability and Mathematical Statistics*. 2020. № 101. Pp. 179-191. DOI: <https://doi.org/10.1090/tpms/1120>.
- [11] Rausand M., Barros A., Hoyland A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Application*. 3-d ed. John Wiley & Sons, Inc., 2021. 864 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119373940>.
- [12] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science*. 2-d ed. A John Wiley & Sons Publication, 2003. 746 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471458503>.

- [13] Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2022. 629 p.
- [14] Neyman J. Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*. 1937. Vol. 236. Pp. 333-380. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1937.0005>.
- [15] Roger J.B. Event classification using weighting methods. *Journal of Computational Physics*. 1987. Vol. 72. Pp. 202-219. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(87\)90078-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(87)90078-7).
- [16] Simonov D., Gorbachuk V. A method of finding solutions in a dynamic model of inventory management under uncertainty. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*. 2022. № 4. Pp. 31-39. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2022/4.4>.
- [17] Descriptive Statistics The Specification of Statistical Measures and Their Presentation in Tables and Graphs. Part 7 of a Series on Evaluation of Scientific Publications / A. Spriestersbach et al. *Deutsches Ärzteblatt international*. 2009. No. 106. Pp. 578-583. DOI: <https://doi.org/10.3238/arztebl.2009.0578>.
- [18] Zubchenko V., Herasymenko M. Analysis of the impact of macroeconomic indicators on the country's rating. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*. 2024. № 78(1). Pp. 36-40. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2024/1.6>.
- [19] Zubchenko V.P., Aleksandrova P.V. Mathematical modeling of the dynamics of an insurance company based on macro indicators. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*. 2023. № 1, pp. 44-47. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/1.6>.
- [20] Zubchenko V.P., Tkachenko A.V. Mathematical model of financial dynamics of an insurance company. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics*. 2022. № 3. Pp. 28-36. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2022/3.3>.
- [21] Бахрушин В.С. Методи аналізу даних: навчальний посібник для студентів. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268 с.
- [22] Боснюк В.Ф. Математичні методи в психології: курс лекцій // Мультимедійне навчальне видання. 2020. Х.: НУЦЗУ, 2020. 141 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11329>.
- [23] Грицюк П.М., Остапчук О.П. Аналіз даних: Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2008. 218 с.
- [24] Єгорова С.М. Про особливості впровадження заasad компетентнісного підходу у вищу професійну освіту фахівців морського транспорту. *Modern Problems and ways of their solution in science, transport and education*. 2014. С. 151.
- [25] Єлейко Я., Ярова О., Головатий С. Побудова статистичних критеріїв з урахуванням впливу зовнішнього середовища. *Вісник Львівського університету. Серія механіко-математична*. 2021. Вип. 91. С. 99-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/vmm.2021.91.099-104>.
- [26] Жлуктенко В.І., Наконечний С.І., Савіна С.С. Теорія ймовірностей і математична статистика. К. : КНЕУ, 2001. 336 с.
- [27] Іващенко П.О., Семеняк І.В., Іванов В.В. Багатомірний статистичний аналіз. Х. : Основа, 1992. 144 с.
- [28] Лапач С.Н., Чубенко А.В., Бабич П.Н. Статистика в науке и бизнесе. К. : МОРИОН, 2002. 640 с.
- [29] Майборода Р.Є. Регресія: Лінійні моделі: навчальний посібник. К. : ВПЦ «Київський університет», 2007. 296 с.
- [30] Паніотто В.І., Максименко В.С., Харченко Н.М. Статистичний аналіз соціологічних даних. К. : Вид. дім «КМ Академія», 2004. 270 с.
- [31] Пашко А.О. Статистичний аналіз даних // Електронне видання. 2019. 55 с. URL: https://csc.knu.ua/media/filer_public/19/d5/19d56780-269a-4eef-bb3b-48ec8da23859/intelektualnaobrobkadanikh.pdf.
- [32] Руденко В.М. Математична статистика: навчальний посібник. К. : Центр учбової літератури, 2012. 304 с.
- [33] Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року : Міжнародний документ від 07.07.1978. 55 с.
- [34] IMO Model Course 7.03. Officer in charge of a navigational watch. Sub-committee on standards of training and watchkeeping. STW 44/WP.6/Add.1.
- [35] IMO Model Course 7.01. Master and chief mate. 2014 Edition. Electronic Edition. STW 43/3/6.

Стаття надійшла 21.03.2025

Стаття прийнята 18.04.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Gudyreva E.M. Modern methods of scientific research in the system of training scientific staff of the Kherson state maritime academy. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 277-287. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336451>.

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 625.089.4

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336454

CONDUCTING TECHNICAL DIAGNOSTICS OF METAL STRUCTURES OF SPECIAL SELF-PROPELLED ROLLING STOCK AND THE MAIN TYPES OF DETECTED INCOMPATIBILITIES

Fomin O.	D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2387-9946 , e-mail: fomin1985@ukr.net ;
Tereshchuk M.	deputy head of the production division, «Refrigerated Car Company» JSC «Ukrainian Railways», Fastiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2976-4579 , e-mail: tereschuk1520mm@gmail.com ;
Lisnychiy V.	graduate student, National Transport University, Kyiv, e-mail: lisnuchuyi_vs@gsuite.duit.edu.ua ;
Cherkashin O.	graduate student, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv

This paper explores the principles of technical diagnostics aimed at detecting defects in the base metal of load-bearing structures through non-destructive testing. It is shown that under static loading conditions, there is degradation of the metal's resistance to brittle fracture in load-bearing structures with detected localized defects. Examples are provided of base metal failure during operation due to fatigue accumulation. Technical diagnostics is a crucial factor to maintain its operational condition, serving as a preventive measure to avoid failures of rolling stock, particularly related to the destruction of load-bearing structures. This can be achieved through a range of activities aimed at detecting various types of nonconformities, including defects in load-bearing structures (such as cracks, fractures, corrosion damage, etc.). The detection and timely elimination of the identified non-conformities are key to the safe and uninterrupted operation of special self-propelled rolling stock. Scientific research in the field of technical diagnostics will facilitate the development of more effective methods and tools for detecting, assessing and predicting defect progression, thereby improving reliability and extending the service life of this type of equipment. One of the major challenges faced by Ukrainian Railways is the presence of defects in the supporting structures of special self-propelled rolling stock. The resolution of this issue lies in the implementation of technical diagnostics using non-destructive testing methods. One of the main methods of non-destructive testing used in technical diagnostics is the magnetic powder method of testing. The magnetic powder method of non-destructive testing is based on the phenomenon of attraction of magnetic powder particles by magnetic scattering fluxes that arise over defects in magnetized test objects.

Keywords: transport, special self-propelled mobile units, repair, diagnostics, modeling.

Statement of the problem

For the safe operation of existing special self-propelled mobile units, it is necessary to take into account the negative impact of various damages on the mechanical properties of load-bearing structures, especially when assessing their technical condition based on defectoscopy results. This paper explores the principles of technical diagnostics aimed at detecting defects in the base metal of load-bearing structures through non-destructive testing. It is shown that under static loading conditions, there is degradation of the metal's resistance to brittle fracture in load-bearing structures with detected localized defects. Examples are provided of base metal failure during operation due to fatigue accumulation.

Scientific research in the field of technical diagnostics of metal structures of special self-propelled mobile units is extremely important for several key reasons:

- Enhancing safety: Timely detection and elimination of defects in metal structures prevent accidents, injuries to personnel and passengers, and damage to infrastructure.
- Extending service life: Regular and high-quality diagnostics enable timely repairs, significantly extending the operational life of special mobile units and reducing replacement costs.
- Optimizing maintenance costs: Scientifically based diagnostic methods accurately determine the condition of structures and predict repair needs, optimizing maintenance schedules and reducing unforeseen expenses.
- Increasing operational efficiency: Reliable and properly functioning equipment ensures uninterrupted and efficient operation of special self-propelled mobile units, which is critically important for their specific tasks.
- Implementing new technologies: Scientific research promotes the development and implementation of new, faster, and more accurate methods of non-destructive

testing and diagnostics, improving the quality of metal structure assessments.

- Improving the regulatory framework: Research results can be used to update and improve existing norms and standards in the field of technical diagnostics and operation of special mobile units.

Technical diagnostics (TD) of metal work of special self-propelled rolling stock (SPRS) is critical to ensure their reliable and safe operation throughout their entire life cycle. This category of rolling stock includes a variety of machinery and mechanisms used in specific industries, such as construction, mining, agriculture, railways, and others. The characteristic features of SPRS operation are:

- High dynamic and static loads: Work in harsh environments, often with overloads, vibrations, and shocks.

- Aggressive operating conditions: The exposure to environmental factors (moisture, temperature changes), as well as chemically active agents and abrasive materials.

- Specific operating conditions: Cyclic loads, long-term periods of inactivity followed by high intensity use.

- Responsibility of the tasks performed: Failure of the SPRS can lead to significant financial losses, injuries to personnel and environmental disasters.

- Design complexity: A large number of welded joints, moving elements, components and units requiring an integrated approach to diagnostics.

Despite the importance of TD, there are a number of issues that require scientific research and resolution:

- Insufficient development of diagnostic methods and means adjusted to the specifics of SPRS. Most of the existing TD methods are focused on general industrial equipment or vehicles for general-purpose use and do not fully take into consideration the design features and operating conditions of SPRS. This leads to a decrease in the accuracy and validity of diagnostics.

- The challenge of predicting the remaining resources of steel installations. Precise determination of the moment of critical defects occurrence and forecasting of the service life is a difficult task due to the multifactorial nature of damage accumulation processes. Existing wear and fracture models often do not take into account the full range of influencing factors.

- Limited possibilities of non-destructive testing (NDT) in operation.

Conducting high-quality NDT on large-sized and inaccessible elements of SPRS metal components is often technically difficult and costly. There is a need to develop more flexible, fast and highly sensitive NDT methods.

- Lack of complex systems for diagnosing and monitoring technical conditions.

Most enterprises use disparate diagnostic methods and tools, which makes it difficult to analyze the data and make reasonable decisions on maintenance and repair.

- There is a demand for integrated systems that combine various diagnostic methods, data processing, and forecasting.

- Insufficient amount of normative and technical documentation regulating the technical diagnostics of SPRS.

Lack of accurate standards, methods and criteria for assessing the technical condition makes it difficult to implement effective diagnostic systems.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Bondarenko et al. (2023) study the dynamic interaction processes between rolling stock and track through experimental implementation [1]. The article presents the methodology and results of field tests aimed at analyzing the forces and displacements arising during train movement. The authors focus on understanding the interaction mechanisms to improve the safety and durability of railway infrastructure. The research has practical significance for optimizing the design of rolling stock and track.

Mukhamedova Z et al. (2021) addresses the issue of resource-saving maintenance and repair of special self-propelled rolling stock [2]. The article analyzes existing approaches to maintenance and proposes improvements to reduce costs and extend equipment service life. The authors emphasize the importance of implementing modern diagnostics and failure prediction methods. The study aims to enhance the operational efficiency of special rolling stock.

Fomin et al. (2024) describes the testing of load-bearing structures of special self-propelled rolling stock with a hydraulic crane and manipulator beyond their normative service life [3]. The article presents the methodology and results of tests aimed at assessing the residual strength and reliability of structures. The authors analyze detected defects and provide recommendations for further operation or repair. The study is important for ensuring the safe operation of special rolling stock after the end of its normative service life.

The article [4] provides an analysis of the technical condition of the structural elements of passenger cars. The vast majority of passenger cars have been in operation for more than 20 years and have already exhausted the resource assigned by the manufacturer. The service life of these cars has been extended several times due to the condition of the load-bearing structures. At the same time, the issue of the condition of the internal equipment of the cars, the level of its environmental safety, and the compliance of comfort systems with modern requirements was not raised. Systems for ensuring comfortable travel in passenger cars, which were designed and manufactured in the 70s-90s of the last century, do not meet modern EU requirements. The low level of comfort causes dissatisfaction among passengers who choose other carriers.

Mitrofanov et al. (2022) addresses the issue of indirect fuel rationing for special self-propelled rolling stock [5]. The article proposes a methodology for determining rational fuel consumption standards by considering various operational factors. The authors examine the benefits of indirect rationing in improving the efficiency of fuel and energy resource utilization. The study is relevant for optimizing the operating costs associated with SSRS.

Mukhamedova (2020) analyzes the assessment of reliability indicators of electromechanical equipment used in special self-propelled rolling stock [6, 7]. The article reviews the main parameters that characterize reliability and the methods used to determine them. The author evaluates the reliability of specific components of SSRS electromechanical equipment. The study's findings can be applied to predict failures and develop measures to improve reliability.

Musayev et al. (2023) examines the theoretical and practical aspects of determining the dynamic characteristics of traction rolling stock [8]. The article reviews various approaches to analyzing train dynamic behavior, including mathematical modeling and experimental studies. The authors highlight the critical importance of precise dynamic parameter evaluation to ensure the safety and efficiency of railway operations. The study offers practical insights for the design and operation of traction rolling stock.

Wang et al. (2023) proposes a vibration-theoretic approach to analyzing the vulnerability of nonlinear vehicle platoons [9]. The article examines models of vehicle movement within platoons and analyzes their stability under disturbances based on oscillation theory. The authors explore the factors influencing platoon vulnerability and propose methods for its assessment. This work contributes to the advancement of traffic management systems for autonomous vehicles.

The article analyzes possible options for the modernization of the fleet of DR-1A diesel trains, which is one of the main diesel trains in Ukraine, providing suburban transportation of passengers on the railways of Ukraine [10]. The main shortcomings in the current design are identified, as well as the reasons, according to which it is necessary to plan and implement the implementation program of the existing fleet of DR-1A diesel trains in Ukraine. An analysis of the experience of modernization of DR-1A diesel trains in countries where such rolling stock has been historically operated has been carried out. Thus, the experience of modernization of such diesel trains in the countries of the European Union – Lithuania and Latvia – was analyzed. It was concluded that it is necessary to form a program for the modernization of diesel trains to increase the efficiency of their use and restore the network of suburban communication on non-electrified sections of the railway. The complex problem of providing rolling stock for suburban transportation in non-electrified areas is defined and a complex approach to solving problematic issues with its provision is proposed.

Sulim et al. (2018) considers the theoretical and practical determination of the parameters of an onboard capacitive energy storage system for underground rolling stock [11]. The article presents a mathematical model for calculating the required parameters of the energy storage system, taking into account the train's modes of movement. The authors also describe experimental studies aimed at confirming the theoretical results. The study is important for the development of efficient energy recuperation systems in the subway.

Vallely (2020) in his doctoral dissertation examines a holistic approach to remote condition monitoring for accurate assessment of rail infrastructure and rolling stock [12]. The work covers various aspects of monitoring, including data collection, analysis, and interpretation to predict the technical condition of objects. The author develops and justifies an integrated approach to remote monitoring that contributes to the safety and efficiency of rail transportation.

The article [13] discusses the issues of aging of the operational fleet of cars. Currently, passenger cars with an extended service life are operated on the railway network of Ukraine, which is rapidly approaching the maximum permissible. The main indicators of transport (technical, economic, environmental), reliability and safety of movement depend on the age of the cars, currently the level of development of technical means and repair technologies for the restoration of rolling stock is rapidly increasing. To improve the competitiveness of rail passenger transportation, it is necessary to update the fleet of passenger cars, which will reduce repair costs.

Purpose and task statement

The main purpose of the article is to highlight the procedure for technical diagnostics of metal structures of special self-propelled rolling stock (for example, cranes, wagons, special equipment) in order to ensure their safe and reliable operation by timely detection of defects, assessment of technical condition and prediction of residual life.

Main objectives of the study

1. Assessment of the technical condition of structures - determination of strength, resistance to cracks, corrosion, fatigue and other types of damage.

3. Prediction of residual life - determination of the possibility of further operation or the need for repair/replacement.

4. Optimization of inspection frequency - scientific justification of the terms of technical inspection based on the analysis of material degradation.

Summary of the main material

Diagnostics is generally aimed at determining the state of certain objects or living beings. Technical diagnostics is designed to determine the state of technical objects. Technical diagnostics of machines studies the signs that characterize the presence of defects in machines and, based on these signs, gives a conclusion about the technical condition of the machine.

Machine diagnostics has existed for as long as the machines themselves have existed. Its simple forms always take place when a search for malfunctions of the technical device used is carried out, even using the most elementary techniques. Simple diagnostics is the most common in technology. Diagnostics becomes more complicated when methods for detecting defects require the use of various special methods and devices, and processing the results is associated with complex mathematical calculations.

Complex diagnostics is used, as a rule, for technical devices of high responsibility, where the economic costs of its implementation are appropriate. Technical diagnostics as a science has its own terms and definitions. Let us give the main ones. The object of technical diagnostics is a product, its component or workpiece, the condition of which is to be determined. In each specific case, the object must be presented in such a formalized form that best meets the tasks of its diagnosis [1-3]

A technical parameter is a physical quantity by which the object of diagnosis is characterized. The technical parameters of an object can be its own mass, the effort it develops, speed, power, acceleration, productivity, as well as linear dimensions, safety margin, resource, etc. Over time, the object deteriorates in its technical condition and its technical parameters deteriorate.

A diagnostic sign is a phenomenon or process that accompanies a change in a technical parameter and can be registered when diagnosing a product. Examples of diagnostic signs for machines can be a decrease in speed or effort in the mechanism, loss of drive power, as well as a change in stresses in areas of damage to parts, structural vibration, etc. The indicator of a diagnostic feature is a quantitative expression of a diagnostic feature. The indicator is expressed by a physical quantity by which a diagnostic feature is measured. Retrospection is a review of past events. In relation to diagnostic tasks, retrospection consists in reviewing the statistics of changes in a technical parameter in the past, that is, until the moment of diagnosing the object. Diagnosis is the result of diagnosis. This is a specific quantity that characterizes the state of the object according to the results of its diagnosis. The value of the diagnosis can be absolute (deterministic) or probable. Forecasting is a logical continuation of diagnosis and means a prediction, a scientific forecast of the state of the object in the future. Forecasting is performed on the basis of retrospection and diagnosis data. Forecast - the result of forecasting. The methods of presenting the forecast are generally the same as those of the diagnosis. A defect is a deviation in the technical condition of an object or its individual parts. There is a somewhat narrower concept of a defect as a defect in a product obtained during its manufacture. Damage is a defect that occurs when using an object. A formalized model of an object is the result of its schematization for diagnostic purposes. The model differs from drawings, structural, kinematic, principle and other schemes in that it best corresponds to solving the problems of obtaining diagnostic data of an object. A defect model is a generalized number of possible violations in the design or operation of a machine that change its technical condition. A technical diagnostic tool is a device or other technical device designed to register a diagnostic feature and its quantitative assessment. A diagnostic method is a way of searching for a phenomenon to detect a defect, measure it and process the results obtained. A diagnostic algorithm is a general procedure for performing operations during diagnostics up to data processing and obtaining the final result. A technical diagnostic system is a set of formalized

models, methods and technical means of detecting defects, as well as an algorithm for diagnosing an object. Diagnostic error is the probability that the technical condition in which the object is actually located at the moment will be found as a result of the applied system [4, 5].

The main types of inconsistencies detected

1. Cracks and tears - in areas of high stress (welds, attachment points of components).
2. Corrosion damage - loss of metal thickness, pitting or intercrystalline corrosion.
3. Deformations - curvature, deflection, loss of geometric shape due to mechanical stress.
4. Defects of welded joints – incomplete penetration, pores, slag inclusions.
5. Fatigue damage - microcracks due to cyclic loads.
6. Wear of friction units - damage to joints, bearings, fasteners.
7. Damage from impacts and overloads - localized tears, dents.

The following types of inconsistencies are most often detected during technical diagnostics of metal structures of special self-propelled rolling stock:

Defects in welded joints:

Cracks: Longitudinal, transverse, root, in the heat affected zone.

Failures and incomplete penetration: Lack of connection between welded elements.

Porosity and slag inclusions: Defects that reduce strength and corrosion resistance.

Undercuts: Reduced cross-section of the base metal near the weld.

Unevenness of the weld: Deviations from the specified dimensions and shape.

Corrosion damage:

General (pitting) corrosion: Uniform destruction of the metal surface.

Pitting corrosion: Localized pitting.

Crevice corrosion: Corrosion in narrow gaps and under seals.

Intercrystalline corrosion: Failure along the grain boundaries of a metal.

Stress corrosion cracking: Failure due to both the corrosive environment and stresses.

Deformation and geometric deviations:

Residual deformation: Distortions, deflections, twisting of structural elements.

Change in geometric dimensions: Deviations from the design values.

Fatigue cracks: The formation and development of cracks under cyclic loads.

Wear and damage to friction surfaces: Reduction in size, scoring, chipping.

Mechanical damage:

Cracks and tears: Due to impact loads, overloads or stress concentrations.

Dents and scratches: Damage to the surface due to external influences.

Distortion and breakage of individual elements.

In view of the above, it can be argued that the identification and classification of these discrepancies is a primary task of technical diagnostics, since it is on their basis that decisions are made on the need and nature of repair work to ensure the safe and reliable operation of special self-propelled rolling stock.

Rail transport is a leading sector of the transportation system. Technical diagnostics is a crucial factor to maintain its operational condition, serving as a preventive measure to avoid failures of rolling stock, particularly related to the destruction of load-bearing structures. This can be achieved through a range of activities aimed at detecting various types of nonconformities, including defects in load-bearing structures (such as cracks, fractures, corrosion damage, etc.). One of the most common types of nonconformities in load-bearing structures is cracking in welded joints or in the base metal itself. One way to enhance the operational efficiency of special self-propelled rolling stock is to improve its load-bearing structures to ensure stable reliability indicators. This will contribute to higher operational efficiency and to the development of new designs for future special self-propelled rolling stock [6-8].



Fig. 1 – Special self-propelled rolling stock type ADM

ADM - assembly and restoration railcar for power supply services, a self-propelled two-axle vehicle with an internal combustion engine, equipped with special technological equipment (Fig. 1). It is used in construction, assembly and repair work, as well as in current maintenance of the contact network. It is equipped with a drilling rig for developing pits for railway supports of the contact network

and a crane-manipulator for their installation, as well as a grounded lifting and retractable assembly platform with a telescopic tower.



Fig. 2 – Special self-propelled rolling stock type DHK^U

DHK^U - intended for repairing and dismantling work and transportation of vantage materials during in-line repair and repair of slick tires, as well as transportation of work crews with tools to the site repair and track robots (Fig. 2). A railcar can be used for supplying electricity to residents with a total power of up to 30 kW. The tires are equipped with a cantilever-type rotating jack-up crane. The crane drive is electromechanical. The capacity of freight trolley with manipulator from 1.7 to 3.5 t (for DGKu-5 from 2 to 5 t) is constant. To reload the trolley, a hydromechanical gearbox is used, which allows for smooth acceleration and reloading at low speeds.

Technical diagnostics was conducted on the metal structures of special self-propelled rolling stock to detect nonconformities (deformations, fractures, breaks, cracks) in structural elements. Technical diagnostics refers to the set of measurement, calculation, and logical operations that, based on their results, allow an assessment of the actual condition of the inspected object and, accordingly, enable the adoption of necessary management measures.

The condition of the frame metal structures was assessed using non-destructive testing (NDT) methods. One of the primary NDT methods used during technical diagnostics was the magnetic particle testing method. Magnetic particle testing is based on the phenomenon of magnetic flux leakage at defects, which attracts magnetic powder particles applied to the magnetized objects under inspection.

Table 1

Main types of nonconformities detected in load-bearing structures during technical diagnostics

Nonconformity type	Quantity, pcs
Cracks in the base metal	33
Cracks in welded joints	27
Cracks in the water heater suspension brackets	23
Total	83

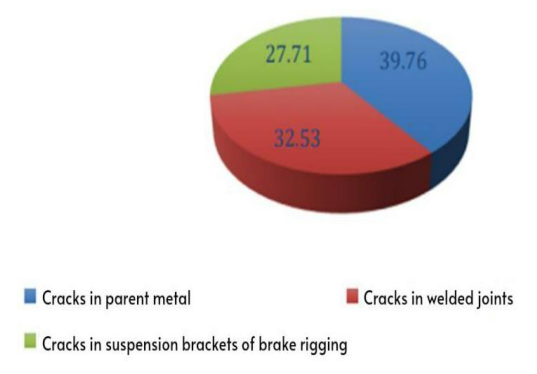


Fig. 3 – Distribution of the main types of non-conformities as a percentage

Figure 3 shows that the non-conformities are generally distributed in approximately equal proportions, with a slight increase (7%) in cracks detected in the parent metal, amounting to 39.76% as a consequence of metal aging. This conclusion is supported by an analysis of the age structure of the SSRS (special self-propelled rolling stock) fleet, obtained from open sources, indicating that 619 units or 81.5%, have been in operation for more than 20 years. The average age of the SSRS fleet is 35 years.

Figure 4 shows the distribution diagram of the main non-conformities by type of special self-propelled rolling stock. As can be seen from the diagram, the highest number of non-conformities is associated with two types of rolling stock:

- 1) railcars of the mounting diesel railcar series;
- 2) trolleys of the freight crane multipurpose rail trolley series.

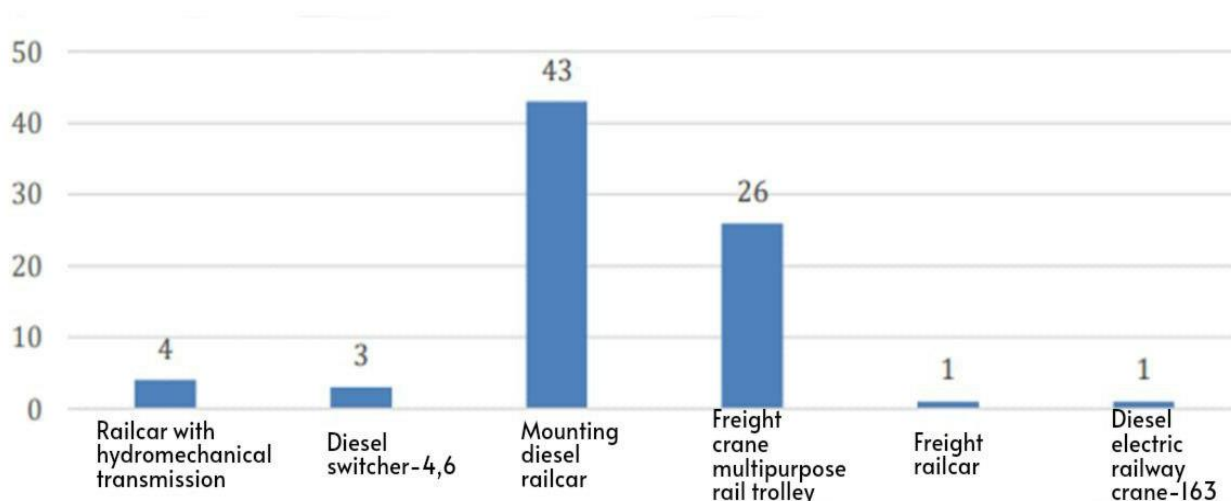


Fig. 4 – Distribution of the main non-conformities by type of special self-propelled rolling stock

Table 2

Distribution of the main non-conformities by types of special self-propelled rolling stock

	Railcar with hydromechanical transmission	Diesel switcher-4,6	Mounting diesel railcar	Freight crane multipurpose rail trolley	Freight railcar	Diesel electric railway crane-163
1	2	3	4	5	6	7
Cracks in parent metal	1	3	16	12	1	-
Cracks in welded joints	2	1	15	8	-	1
Cracks in suspension brackets of brake rigging	1	-	16	6	-	-

The primary non-conformities detected in supporting structures during technical diagnostics are fatigue cracks of various types. As shown in Table 2, the most common

defects include cracks in parent metal, cracks in welded joints and cracks in suspension brackets of brake rigging (Fig. 5).



Fig. 5 – Non-conformities detected in supporting structures during technical diagnostics

Fatigue failure is the failure of metals under the action of constant (cyclic) loads. The physical nature of fatigue failure of metals is quite complex and not fully understood. One of the main consequences of fatigue failure is considered to be the occurrence and growth of cracks [9].

Fatigue failure compared to failure from a single application of static load has a number of features:

- it occurs at stresses lower than those under static load, usually lower than the yield strength;
- fractures occur on the surface or under the surface in specific places of stress concentration (ruptures, deformation). Local stress concentration occurs as a result of damage to materials as a result of constant loading or due to poor-quality processing, atmospheric exposure or aggressive environment, etc.;
- fracture occurs in several stages, which determine the processes of fatigue accumulation in the material, crack formation, gradual development and fusion of some of them into one main defect and rapid destruction of the material [11];
- the failure has a characteristic fracture structure, which reflects the sequence of processes that occurred. The fracture consists of a fracture center (place of microcrack formation). The fracture center is adjacent to the surface of the sample (part) and has small dimensions and a smooth surface [12-13]. The fatigue zone is formed by the sequential development of a fatigue crack. In this zone, characteristic grooves are observed, which have a ring configuration, which indicates the jump-like advancement of the fatigue crack [15]. The fatigue zone develops until the stresses in the working cross-section, which are decreasing, increase so much that they cause its instantaneous failure.

This last stage of failure is characterized by the dolam zone.

The resolution of the specified issue must be based on pre-repair diagnostics of the condition and timely scheduling of special self-propelled rolling stock for repair. It should also involve additional diagnostics at repair facilities, the selection of technologies that ensure the required repair quality and the determination of the necessary scope of work.

Conclusions

The detection and timely elimination of the identified non-conformities are key to the safe and uninterrupted operation of special self-propelled rolling stock. Scientific research in the field of technical diagnostics will facilitate the development of more effective methods and tools for detecting, assessing and predicting defect progression, thereby improving reliability and extending the service life of this type of equipment.

The conducted study revealed that one of the major challenges faced by Ukrainian Railways is the presence of defects in the supporting structures of special self-propelled rolling stock. The resolution of this issue lies in the implementation of technical diagnostics using non-destructive testing methods.

References

- [1] I. Bondarenko, V. Lukoševičius, R. Keršys, and L. Neduzha, «Investigation of Dynamic Processes of Rolling Stock-Track Interaction: Experimental Realization», *Sustainability*, vol. 15(6), article 5356, 2023. doi: 10.3390/su15065356.

- [2] Z. Mukhamedova, «Resource-saving maintenance and repair of special self-propelled rolling stock», *Psychology and Education Journal*, vol. 58(1), pp. 3550-3555, 2021. doi: [10.17762/pae.v58i1.1305](https://doi.org/10.17762/pae.v58i1.1305).
- [3] O. Fomin, M. Tereshchuk, A. Cherkashin, O. Ptashnyi, Ie. Gunko, and I. Rodionov, «Testing of the Bearing Structures of a Special Self-Propelled Rolling Stock with Hydraulic Crane and Manipulator Device Beyond the Limits of the Normal Service Period», in *Proc. of the 28th Int. Sci. Conf., Kaunas, Lithuania, 2024*, pp. 804-809. doi: [10.5755/e01.2351-7034.2024.p804-809](https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p804-809).
- [4] I. Martynov, Yu. Kalabuxin, A. Trufanova, and S. Martynov, «Analiz vidmov lehkovykh avtomobiliv» [«Analysis of passenger cars failures»], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, vol. 6, № 187, pp. 289-294, 2024. doi: [10.33042/2522-1809-2024-6-187-289-294](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-289-294). (Ukr.)
- [5] A. Mitrofanov, A. Ivaschenko, A. Avsieievich, V. Avsieievich, and O. Golovnin, «Indirect Fuel Rationing for a Special Self-Propelled Rolling Stock», *Energies*, vol. 15(3), article 836, 2022. doi: [10.3390/en15030836](https://doi.org/10.3390/en15030836).
- [6] Z.G. Mukhamedova, «Assessment of reliability indices of electromechanical equipment of special self-propelled rolling stock», *Journal of Science and Innovative Development*, vol. 3(5), pp. 135-140, 2020. doi: [10.36522/2181-9637-2020-5-16](https://doi.org/10.36522/2181-9637-2020-5-16).
- [7] Z. Mukhamedova et al., «Calculating the fatigue strength of load-bearing structures of special self-propelled rolling stock», *Scientific Reports*, vol. 14(1), article 19205, 2024. doi: [10.1038/s41598-024-70169-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-70169-0).
- [8] J. Musayev, A. Zhauyt, S. Ismagulova, and S. Yussupova, «Theory and Practice of Determining the Dynamic Performance of Traction Rolling Stock», *Applied Sciences*, vol. 13(22), article 12455, 2023. doi: [10.3390/app132212455](https://doi.org/10.3390/app132212455).
- [9] P. Wang, X. Wu, and X. He, «Vibration-Theoretic Approach to Vulnerability Analysis of Nonlinear Vehicle Platoons», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 10, pp. 11334-11344, 2023. doi: [10.1109/TITS.2023.3278574](https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3278574).
- [10] D. Lomotko, O. Krasnoshtan, O. Kava, B. Novytskyi, and S. Pyshnyak, «Визначення оптимальних структур модернізації дизель-поїздів ДР-1А для відновлення логістики приміських пасажирських залізничних перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці» [«Defining of optimal modernization structure of DR-1A diesel motor units for suburban passenger rail logistics development on non-electrified railway lines»], *Informatsiini ta upravliaiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems at railway transport*, № 3, pp. 43-52, 2023. doi: [10.18664/ikszt.v28i3.290118](https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i3.290118). (Ukr.)
- [11] A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, and A. Mastepan, «Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock», *Scientific Bulletin of National Mining University*, iss. 5(1), pp. 79-87, 2018. doi: [10.29202/nvngu/2018-5/8](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8).
- [12] P. Valley, «A Holistic Approach to Remote Condition Monitoring for the Accurate Evaluation of Railway Infrastructure and Rolling Stock», doctoral dissertation, University of Birmingham, UK, 2020.
- [13] Мартинов І., Труфанова А., Сергієнко М. «Analiz osoblyvostei ekspluatatsii kuzoviv pasazhyrskykh vahoniv» [«Analysis of peculiarities of passenger car body wear»], *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, vol. 196, pp. 129-139, 2021. doi: [10.18664/1994-7852.196.2021.242250](https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242250). (Ukr.)

ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО САМОХІДНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ОСНОВНІ ТИПИ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ, ЩО ВИЯВЛЯЮТЬСЯ

Фомін О.В.	д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2387-9946 , e-mail: fomin1985@ukr.net ;
Терещук М.П.	заступник начальника виробничого відділу, «Рефрижераторна вагонна компанія» АТ «Укрзалізниця», м. Фастів, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2976-4579 , e-mail: tereschuk1520mm@gmail.com ;
Лісничий В.С.	аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, e-mail: lisnuchuyi_vs@gsuite.duit.edu.ua ;
Черкашин О.П.	аспірант, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ

У цій статті досліджуються принципи технічної діагностики, спрямованої на виявлення дефектів основного металу несучих конструкцій за допомогою неруйнівного контролю. Показано, що в умовах статичного навантаження відбувається погіршення стійкості металу до крихкого руйнування в несучих конструкціях з виявленими локалізованими дефектами. Наведено приклади руйнування основного металу під час експлуатації

внаслідок накопичення втоми. Технічна діагностика є вирішальним фактором для підтримки його експлуатаційного стану, слугуючи профілактичним заходом для уникнення відмов рухомого складу, зокрема пов'язаних з руйнуванням несучих конструкцій. Цього можна досягти за допомогою комплексу заходів, спрямованих на виявлення різних видів невідповідностей, включаючи дефекти несучих конструкцій (такі як тріщини, розломи, корозійні пошкодження тощо). Виявлення та своєчасне усунення виявлених невідповідностей є ключем до безпечної та безперебійної експлуатації спеціального самохідного рухомого складу. Наукові дослідження в галузі технічної діагностики сприятимуть розробці більш ефективних методів та інструментів для виявлення, оцінки та прогнозування прогресування дефектів, тим самим підвищуючи надійність та продовжуючи термін служби цього типу обладнання. Однією з основних проблем, з якими стикається Українська залізниця, є наявність дефектів у несучих конструкціях спеціального самохідного рухомого складу. Вирішення цієї проблеми полягає у впровадженні технічної діагностики з використанням методів неруйнівного контролю.

Ключові слова: транспорт, спеціальний самохідний рухомий склад, ремонт, діагностика, моделювання.

Перелік використаних джерел

- [1] Investigation of Dynamic Processes of Rolling Stock-Track Interaction: Experimental Realization / Bondarenko I., Lukoševičius V., Keršys R., Neduzha L. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(6). Article 5356. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065356>.
- [2] Mukhamedova Z. Resource-saving maintenance and repair of special self-propelled rolling stock. *Psychology and Education Journal*. 2021. Vol. 58(1). Pp. 3550-3555. DOI: <https://doi.org/10.17762/pae.v58i1.1305>.
- [3] Testing of the Bearing Structures of a Special Self-Propelled Rolling Stock with Hydraulic Crane and Manipulator Device Beyond the Limits of the Normal Service Period / O. Fomin et al. *Transport Means 2024* : Proceedings of the 28th International Scientific Conference, Kaunas, Lithuania, 2-4 October 2024. Pp. 804-809. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p804-809>.
- [4] Аналіз відмов легкових автомобілів / Мартинов І., Калабухін Ю., Труфанова А., Мартинов С. *Комуніальне господарство міст*. 2024. Т. 6, № 187. С. 289-294. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-289-294>.
- [5] Indirect Fuel Rationing for a Special Self-Propelled Rolling Stock / A. Mitrofanov et al. *Energies*. 2022. Vol. 15(3). Article 836. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15030836>.
- [6] Mukhamedova Z.G. Assessment of reliability indices of electromechanical equipment of special self-propelled rolling stock. *Journal of Science and Innovative Development*. 2020. Vol. 3(5). Pp. 135-140. DOI: <https://doi.org/10.36522/2181-9637-2020-5-16>.
- [7] Calculating the fatigue strength of load-bearing structures of special self-propelled rolling stock / Z. Mukhamedova et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14(1). Article 19205. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70169-0>.
- [8] Theory and Practice of Determining the Dynamic Performance of Traction Rolling Stock / Musayev J., Zhauyt A., Ismagulova S., Yussupova S. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(22). Article 12455. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212455>.
- [9] Wang P., Wu X., He X. Vibration-Theoretic Approach to Vulnerability Analysis of Nonlinear Vehicle Platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 24, no. 10. Pp. 11334-11344. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3278574>.
- [10] Визначення оптимальних структур модернізації дизель-поїздів ДР-1А для відновлення логістики приміських пасажирських залізничних перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці / Д. Ломотько та ін. *Інформаційні та управляючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 43-52. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i3.290118>.
- [11] Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / Sulim A.O., Fomin O.V., Khozha P.O., Mastepan A. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5(1). Pp. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
- [12] Valley P. A Holistic Approach to Remote Condition Monitoring for the Accurate Evaluation of Railway Infrastructure and Rolling Stock : doctoral dissertation. University of Birmingham, 2020. 207 p.
- [13] Мартинов І., Труфанова А., Сергієнко М. Аналіз особливостей експлуатації кузовів пасажирських вагонів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 129-139. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242250>.

Стаття надійшла 15.05.2025

Стаття прийнята 10.06.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Conducting technical diagnostics of metal structures of special self-propelled rolling stock and the main types of detected incompatibilities / Fomin O., Tereshchuk M., Lisnychiy V., Cherkashin O. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 50. С. 288-296. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336454>.

275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

UDC 656.135.073

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336474

MODELING OF INFORMATION ARCHITECTURE AND INFORMATION SUPPORT OF TRANSPORTATION IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Sharko O. D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-7990>, e-mail: avssharko@gmail.com;
Movchan P. postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1004-6651>, e-mail: mpv01121988@gmail.com

The article considers the content characteristics of the information architecture of transport logistics (IATL) as a means of orientation on websites using appropriate interfaces and dialog windows. The logistical and physical description of the information support of transport operations is given. The scheme of the IATL is proposed for complex transportations carried out in conditions of uncertainty of external environmental influences and risk. The IATL is built on a structural-functional organizational basis, which allows forming groups of information objects based on understanding of the ultimate needs, patterns of perception and features of transport logistics. A distinctive feature of the proposed scheme is the categorization of information architecture modules in a certain format and its adaptability to the external environment. The use of information in the proposed scheme highlights the following components: the presence of priorities in the application of input information and software and hardware, the location and ranking of auxiliary subsystems according to their importance in making decisions regarding transportation conditions, coordination of interactions, the presence of logical subordination relationships between the elements of the scheme, alternation and sequence of functional procedures, coordination of goals and interactions, timely transfer of information, development of methods for eliminating uncertainty. A logistic mathematical model of the information architecture of transport transportation is proposed, an information structure and a simulation model of management under uncertainty, which includes the relationships between goals, alternative means of achieving them and available resources. The use of basic theoretical principles and organizational and methodological provisions when creating blocks of information architecture provides the ability to adjust management decisions to increase the efficiency of transportation according to developed and agreed plans. The development of transport and logistics information architecture systems allows for a deeper understanding of the complex interactions of elements within the system, to assess the degree of influence of factors, and to identify bottlenecks. The scientific direction of this aspect includes methods of choice theory, expert systems, simulation modeling, Markov processes, dynamic programming, fuzzy logic game theory. All of them are related to multi-criteria assessments of the current situation and have elements of risk in achieving alternative options for managing transportation.

Keywords: information architecture, transport logistics, transportation, structural diagrams, functional approach, uncertainty.

Statement of the problem

The intensive process of relocation of production from Western Europe and the USA to the countries of Southeast Asia and the formation of a reverse flow of finished products in the context of growing consumption in developed countries have become the main incentive for the development of the world market of transport and logistics services.

Transport logistics is based on the integration of transport, supply, storage, and sales. Its task is to develop a route that allows cargo to be delivered from the sender to the recipient in a short time with minimal costs. In the process of logistics development, the problems of optimizing the volume of deliveries, routes, placement, warehouse sizes, and monitoring of transport flows along the entire route are solved. To facilitate their solution, the appropriate information architecture is used.

Information architecture is a set of processes for organizing structured information to navigate through websites with the distribution of cognitive load and orientation

through the appropriate interfaces and dialog boxes when it is necessary to convey the importance of various parts of the content to create a scenario. Information architecture denotes the fundamental organization of the target system, which describes the main components and modules with the principles of their operation and interrelation with each other, as well as various variations of development and evolution of events.

Information architecture is designed to support the parameters of transport flows, coordinating the actions of all transport links on an interactive map to ensure maximum use of resources by optimizing transport operations.

Transport logistics functions under dynamic changes in the external environment when the influence of the external environment is unpredictable, i.e. under conditions of uncertainty. Therefore, information support for technological operations of transport transportation under challenging conditions of their implementation becomes relevant. Uncertainty is a system-wide property associated with limited knowledge about the state of the external

environment. Risk arises from uncertainty and is understood as the probability of a negative outcome of events.

The problem under consideration relates to decision-making on the organization of transportation when unforeseen situations arise on the route.

The lack of the necessary level of consistency and dynamism in the field of transportation is the rationale for the need to develop new theoretical principles and organizational and methodological provisions in creating information architecture blocks.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Among the topics of information architecture of transport logistics (IATL), it is worth noting the works of domestic scientists in the field of analytical methods for managing the development of innovations and transport flows in logistics [1-4].

The international logistics platform of information architecture distributes information across countries with complex businesses and various data sources. The architecture of the information service for the international multimodal corridor POL-Corridor is presented in [5]. In [6], a service-oriented architecture of distribution and exchange of data in a heterogeneous environment is analyzed and designed. Information architecture for solving the problems of filtering, aggregation and operational analysis of downstream flows is presented in [7, 8]. A conceptual service-oriented program of information architecture with the interception of digital events related to transportation and monitoring of logistics processes with the presentation of interfaces is described in [9]. A method of operational information management on a route in the form of graph nodes describing stops between destinations, edges describing distances between routes and correspondence of implementations along several routes is presented in [10]. A collision-free pathfinding for multiple agents based on neural structures is presented in [11]. A system architecture of intelligent transport logistics based on collecting and transmitting information for electronic coding in urban

transport management is described in [12]. A functional model of the information architecture of the transport and logical platform is presented in [13]. Functional requirements for logistics distribution based on Internet of Things technologies are described in [14]. In [15], it is proposed to use the Node-RED programming tool for structured environments of the Internet of Things (IoT) system, using the same technologies and communication protocols to form a logistics apparatus. The form of business logic, hierarchy of information and applications are defined. In [16, 17], an information architecture is proposed that allows integrating information carried in containers into the logistics chain through an open interface platform that supports interaction with ports around the world. Elements of building the information architecture of technical products and processes are described in [18-21].

Despite the obvious advantages of using information architecture, information on its applicability in transport logistics is very limited.

Purpose and task statement

The work aims to build a diagram of the information architecture and information support for multimodal transportation in conditions of uncertainty and risk.

Tasks of the work:

- formation of a logistic mathematical model of transportation,
- physical description of information support for transport operations,
- substantive characteristics of the IATL,
- construction of a diagram of the information architecture and information support for transport logistics.

Summary of the main material

The reasons for the emergence of uncertainty in transport logistics are presented in Fig. 1.

The causes of uncertainty in transport logistics include time-gap deliveries, traffic congestion, dynamic routing, and the gap between operational actions and practice.

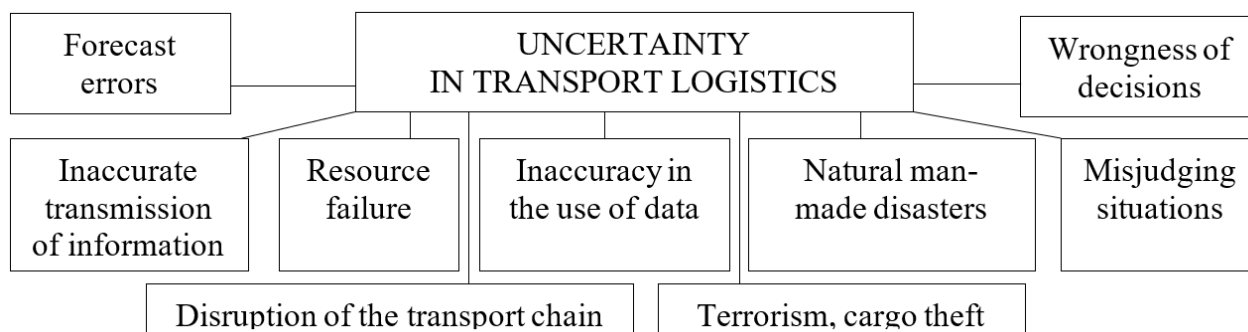


Fig. 1 – Causes of uncertainty in transport logistics

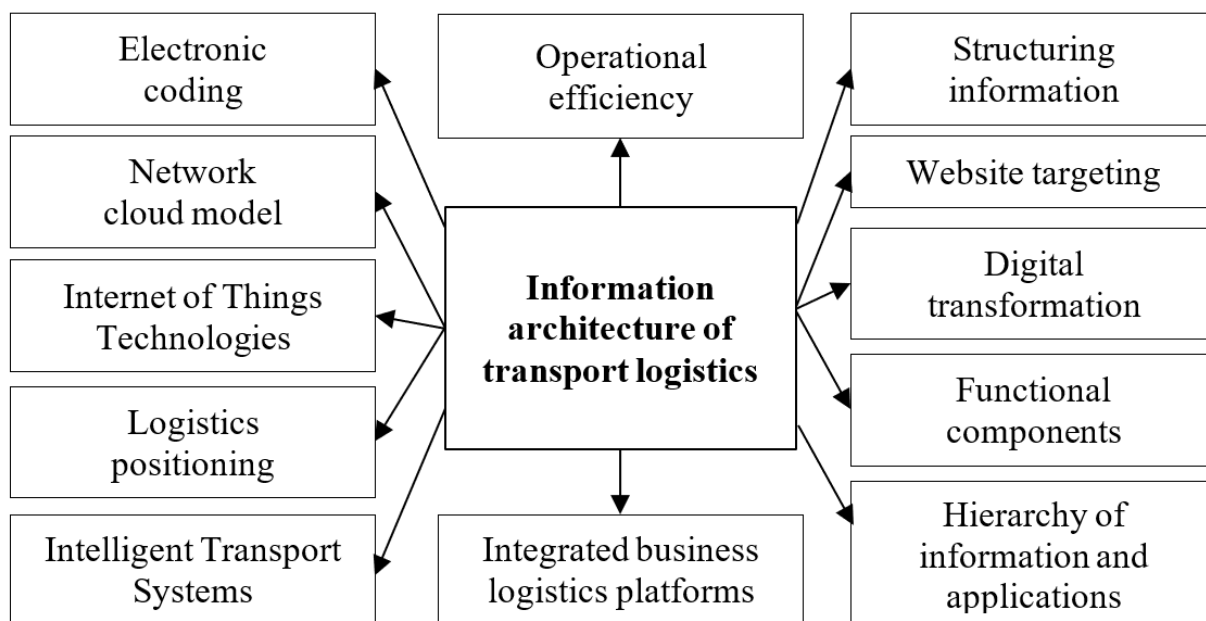


Fig. 2 – Implementation model of the IATL

Transport logistics is currently experiencing a turning point and changing operational purposes. The central place in international freight transport systems is provided by the constant reaction to disruptive events and volatility caused by a combination of various factors and the need to adapt to them. Geopolitical tensions and climatic factors are increasing, which are the basis for macroeconomic uncertainty and digitally enabled globalization models. As for maritime transport, which accounts for about 80% of the world's merchandise trade, it is necessary to solve the problems associated with low carbon emissions and the introduction of cleaner alternative fuels. By the end of 2023, global logistics, which is based on maritime transport, was threatened by events related to the war in Ukraine and events taking place in the Red Sea, Suez and Panama Canals.

Globalization and the development of cooperative relations between participants in the production processes lead to the fact that most freight transportation is carried out by different modes of transport. Today, the share of sea transport with the participation of river and rail transport accounts for up to 90% of the transportation. Rail transport, in interaction with road transport, carries out transportation of up to 35% of all cargo. Since the beginning of military actions in the territory of Ukraine, direct sea deliveries and air transportation have ceased. Today, most domestic cargo crosses the border using freight trains and cars, heading to the seaports of Hamburg, Romania and the Baltic countries, as well as to the airports of Poland in Katowice and Warsaw. The implementation model of the information architecture, compiled on the basis of the analysis and experience of using information technologies in transport logistics, is shown in Fig. 2.

The logical description includes products that define the boundaries between the system and its environment, between functional interfaces and the external system. The logistic mathematical model of transportation is a system of connections between goals, alternative means of achieving them and available resources.

The most acceptable apparatus for formalizing the description of transport management under conditions of uncertainty is the choice of options from a variety of alternatives $\{\chi\}$ [4]. Any alternative can be assigned to this set using the principle of choice F

$$\{\{\chi\}, F\} \rightarrow \chi^*,$$

where χ^* – selected alternative.

Gradation of solutions by the degree of formalization of transport management tasks:

- a set of alternatives $\{\chi\}$ is clearly defined and fixed, and the principle of choice is formalized;
- a set of alternatives $\{\chi\}$ is also strictly defined, but the principle of choosing F is not formalized and carries elements of experience, intuition, subjectivity;
- a set $\{\chi\}$ has no defined boundaries, can be supplemented and modified, and there is no formalization in the principle of choosing F , that is, we have a situation of decision-making under conditions of uncertainty.

Thus, for the values $\{\chi\}$ to F does not have exact values and indications, but there is an assumption of effectiveness and going beyond the limits of formalization.

There is an initial set of alternatives $\{\chi^{(0)}\}$. This initial condition restricts the finite set of alternatives, making the problem statement more concrete.

Another constraint that narrows the task of decision making under uncertainty is that any alternative can be evaluated in terms of its inclusion in $\{\chi\}$. This is achieved using the principle of choice F .

This achieves the invariance of the mathematical description of the behavior of the elements of the information architecture, which gives it universality. Control alternatives are selected depending on the situation, the assessment of which requires diagnostics. The process of changing the state of the system over time is determined by the dynamics of the transport system, characterized by a multidimensional value y , which can take on a number of values at hierarchical levels $y \in Y$.

Having designated the process dynamics parameter as t , and the set of its values through T , we have $t \in T$, where $y = y(t)$. The process of transition of a system from a state with a time parameter value t_0 into state S with value $t > t_0$ we have

$$S_{t_0 t}(y(t_0)) = y(t), y \in Y, t \in T.$$

Having designated through the control action on the course of the process of transport transportation from the entire possible set of controls, we have

$$S_{t_0 t}^u(y(t, u)) = y(t, u), y \in Y, t \in T, u \in U.$$

Each individual management alternative can be assessed by a specific number or value of the corresponding criterion. Then the comparison of alternatives will be reduced to a comparison of the numbers corresponding to them. Let us denote by x some alternative from the set X , then for $x \in X$ a function can be given $q(x)$, called the objective function and having the property that if the alternative x_1 preferable to alternatives x_2 , i.e. $x_1 > x_2$, that $q(x_1) > q(x_2)$.

If there are several ways to compare the obtained alternatives or criteria, the most suitable one for a given situation is selected. Phenomenologically, this means that there is a certain criterion in the hierarchies of which all other properties of the system can be applied by reducing information about them to a single generalized scale.

To formalize each alternative, it is necessary to use a set of their target functions $f_1, f_2, \dots, f_m$, $m \geq 2$, defined on a set of possible solutions X . These objective functions form vector criteria $\vec{f}$. Each component of the vector criterion $\vec{f} = (\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_m)$, as a rule, characterizes some goal. The desire to achieve this goal in mathematical terms is expressed in maximization or minimization of the function f_i on the set X [4].

Taken together, the initial structuring determines the a priori information I or information structure

$$I = \{S, \beta_0(S), X, [X_s \subset X, s \in S], Y, [Y_x \subseteq Y, x \in X], G, q^g(S|S \times Y), w^g(Y \times (S \times X)), g \in G\}$$

where S – set of states;

$\beta_0(S)$ – probability distribution over a set of states;

X – many situations;

$X_s \subset X$ – restrictions on the admissibility of diagnostic alternatives depending on the condition $s \in S$;

Y – a multitude of control alternatives;

$Y_x \subseteq Y$ – restrictions on the admissibility of control alternatives depending on the situation $x \in X$;

G – many structural alternatives;

$q^g(S|S \times Y)$ – transition function from $S \times Y$ in S ;

$w^g(Y \times (S \times X))$ – utility function representing a priori preferences over alternatives $y \in Y$ and structural alternatives $g \in G$.

This information structure allows us to create a simulation model for managing transport operations under conditions of uncertainty.

Mathematically, the problem of finding the best alternative x^* is written as

$$x^* = \arg \max_{x \in X} q(x).$$

However, in practice, an alternative must be assessed not by one, but by several criteria at once, which differ qualitatively from each other. In this case, the search for the necessary management alternative leads to the reduction of a multi-objective problem to a single-objective one. This is achieved by introducing a scalar function of the vector argument $q_0(x)$:

$$q_0(x) = q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)) \dots$$

This function allows you to arrange alternatives by size q_0 and select the best one. The contribution of each criterion to the values q_0 estimated using additive or multiplicative components

$$q_0 = \sum_{i=1}^p \frac{\alpha_i q_i}{S_i},$$

$$1 - q_0 = \prod_{i=1}^p \left(1 - \frac{\beta_i q_i}{S_i}\right).$$

Here is the coefficient S_i introduced to reduce the right-hand side of the equations to a dimensionless form

The simulation model of control under uncertainty is reduced to finding the best alternative x^* in a multi-objective problem it comes down to maximizing the function $q_0(x)$:

$$x^* = \arg \max_{x \in X} q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)).$$

The construction of the IATL begins with its physical description, which defines its mission, the need for its

creation, the formulation of goals, the presence of the existing infrastructure, and consideration of the current situation. The physical description defines the boundaries of the system and the components of the information technology system, the interaction of modules and interfaces with detailed specification. In practical use, the information architecture is a modeling scheme for transport systems with a vertical form of management and subordination in operational activities between elements and subsystems. With the priority arrangement of elements from the top to the bottlenecks in the lower part of the information architecture scheme of transport logistics, the subordination of elements from the center inward is ensured. The choice of the transportation scheme determines the interaction of their structural components. Cargo transportation can be performed either by one carrier from the moment of receiving the cargo until the moment of its delivery to the consumer, or by transferring it to other carriers at separate sections of the route, i.e. stage-by-stage logistics transportation is implemented. In this case, the divisions of the chain are responsible only for their section of work. The complexity of organizing stage-by-stage logistics transportation is that it is necessary to synchronize the actions for transportation by other transport. In the case of an integrated system, the use of sequences of different carriers, including modes of transport, information requests to the main element can come from any department. In this type of transportation, the cargo is assigned to one transport operator, who selects the route and method of delivery of the cargo, takes care of the necessary documents and cargo insurance. The sequence of operations depends on the essence of a specific task and goes to the information processing and transportation process management center. Such a system will be multi-level and hierarchical.

A multi-level hierarchical structure is characterized by a common corporate management system. Authority and responsibility for each decision are transferred to the level of the structure in which decisions are made that are within the competence of this level. Coherence in cargo transportation depends on the precise operation of the entire logistics system. The effectiveness of such a structure will be determined by the communication tools used, taking into account resource constraints and environmental influences. The advantages of a multi-level hierarchical structure of transportation are that it is organized by one company rather than several. In this scheme, information is aimed at providing each level of the information architecture with information about the processes taking place in the logistics system.

The multi-level hierarchical structure of transportation includes three levels:

- the main level, which is the network infrastructure for moving cargo until it is received by consumers
- the first level, which is the functional infrastructure of the route section along which the cargo is transported
- the second level, which is the business processes occurring at the workplace where logical operations are carried out

A similar architecture of a three-level logistics information system using the C# platform and an SQL database is described in [20]. The main problem of managing complex multi-level hierarchical structures is that all elements of such structures function simultaneously and in combination, so synchronization with another type of transport is allocated as a separate structural block.

The sequential division into parts of the route controlled by the center in a multi-level hierarchical system provides for the decomposition of information connectivity between the elements of transport logistics. There is a division of responsibility for the implementation of management operations.

It may happen that during the implementation of the planned activities and plans, the content of the problem under consideration may change, caused by complex interactions with the environment. To eliminate or mitigate negative factors, the information architecture must provide for the correction of management decisions. Information support requires constant monitoring of the transportation process, provision of the necessary information and coordination of the actions of all participants in the movement of cargo.

Information architecture includes conceptual tools that determine the integrity of the product, navigation, orientation priorities, decision points that determine the occurrence of the main scenario. The foundation of information architecture is information. When constructing a diagram of the IATL, information is used as a collective term for storing, transmitting, transforming and collating information about the processes of transportation. The quantitative representation of information is determined through the probability of a possible event and is expressed through the number of messages, operators and files in software.

When constructing a structural and functional diagram of information architecture, the principle of consistency must be observed, which allows for the unity and continuity of the transportation process and an open information space. architecture of transport logistics takes into account the interaction between the elements.

The organizational component of the structure of the information system that determine the order, internal structure and target orientation. It is the logical basis for constructing the information architecture. The functional purposes of the organizational component are determined by the optimization of the parameters of transportation.

Results and discussions

The IATL is built on a structural and functional organizational feature that allows for the formation of groups of information objects based on an understanding of the final needs, perception patterns, and features of transport logistics. The diagram of the structural and functional IATL, compiled on the basis of these provisions, is presented in Fig. 3.

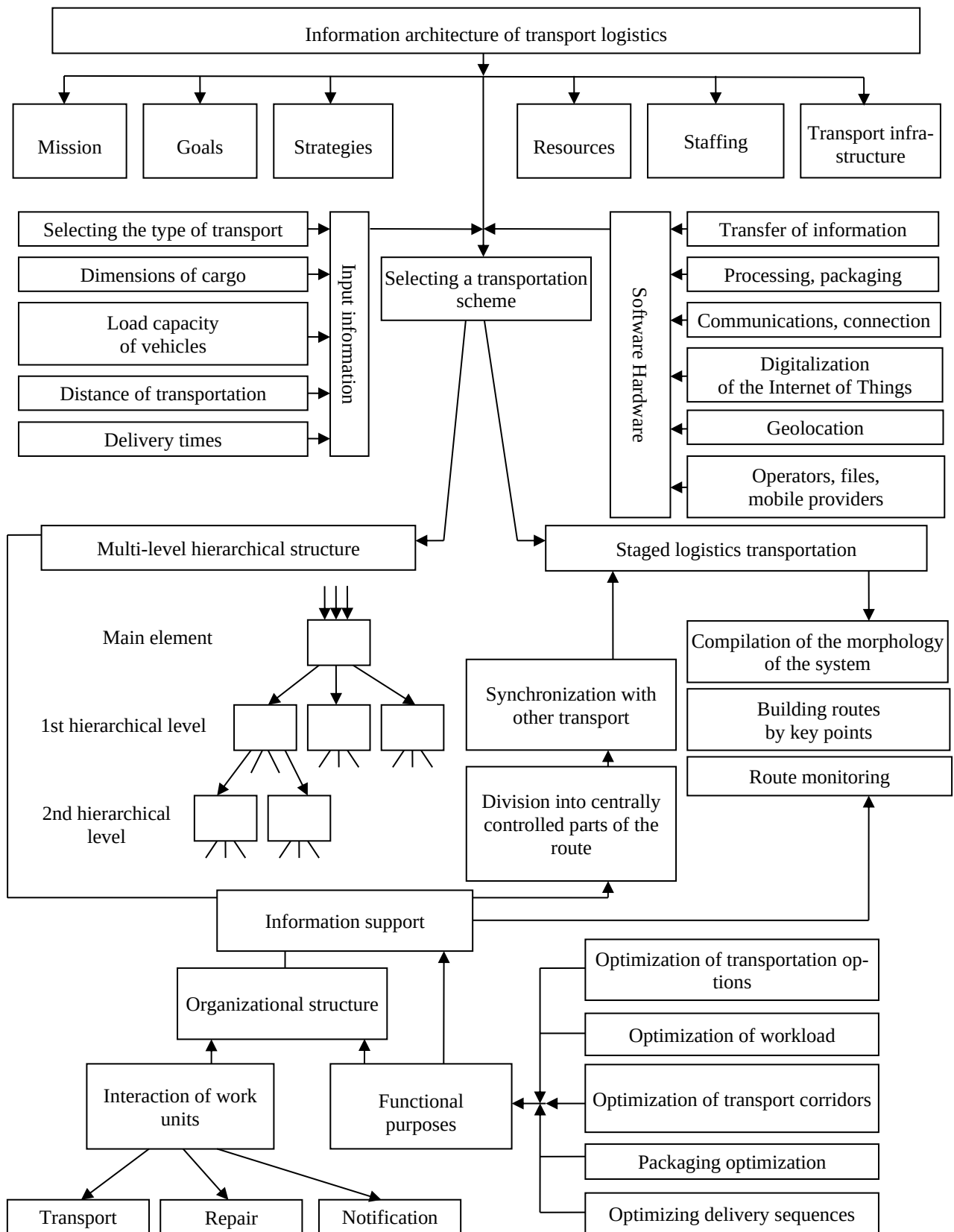


Fig. 3. Scheme of structural and functional IATL

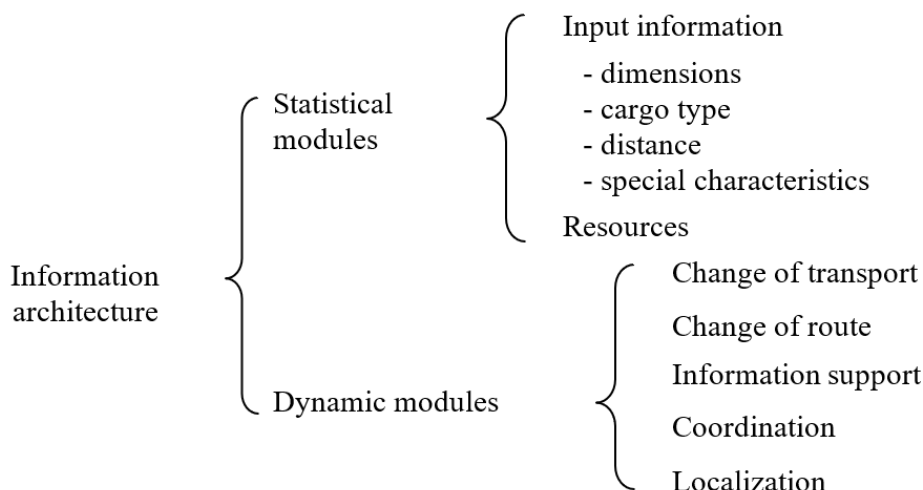


Fig. 4 – Categorization of modules of the information architecture in real time

The use of information in the proposed functional model highlights the following components:

- the presence of priorities in the application of input information and software and hardware.
- the location and ranking of supporting subsystems according to their importance in making decisions on transportation conditions
- coordination of interactions
- the presence of logical subordination relationships between the elements of the scheme
- alternation and sequence of functional procedures
- coordination of goals and interactions
- timely transfer of information
- development of uncertainty removal techniques.

Communication of information architecture modules, in a certain format, is shown in Fig. 4.

Information on identification and information support of the state of moving objects is used in software processors of service departments of links in the chain of transport transportation. The scheme of structural and functional IATL requires concentrated information for using knowledge and technologies of the subject area of transport transportation in conditions of uncertainty of the influence of the external environment.

Modern innovations in the field of multimodal transportation and information support are digitalization and automation of logistics processes, implementation of Internet of things technologies, implementation of computer technologies.

Logistics of sea transportation is a system of procedures aimed at their implementation and organization of cargo delivery by sea. Transport logistics focuses exclusively on the management of transportation and movement of goods. While general logistics covers a wider range. Including inventory management, production and distribution of goods.

An example of modeling the information architecture of sea transport logistics can be the organization of existing information on the current state of sea transport logistics by directions and current development trends in the context of large volumes of unstructured and poorly formalized information (Fig. 5). The purpose of such a structure is the introduction of information technologies into transport activities. When constructing the information architecture scheme, we tried to support the following principles: the content of websites should be located in the order of their subordination, the distribution of priorities is carried out by the levels of the logical hierarchy.

In the presented scheme, it is proposed to use spreadsheets, page templates, headings, satellite images, software and hardware solutions, electronic document management as tools for providing visual support. Information systems of port facilities, operational management of vessel arrival, transport, distribution centers of communication with other types of transport, digitalization of operations can be used as segmentation of the application of the maritime industry.

The information architecture of maritime transport logistics includes a combination of organization, labels, navigation and search implemented in the information system. Without information architecture, the content does not have a logical division and clear ways of their implementation. The presented scheme creates a visualization of page hierarchies, which can determine navigation and search structure. Grouping information by topics of interest using the proposed navigation, categorization and structuring blocks helps users navigate messages of different practical content more effectively.

Prospects for further research lie in the construction of information transport logistics schemes with detailed filling of the columns of the proposed structuring and classification of features.

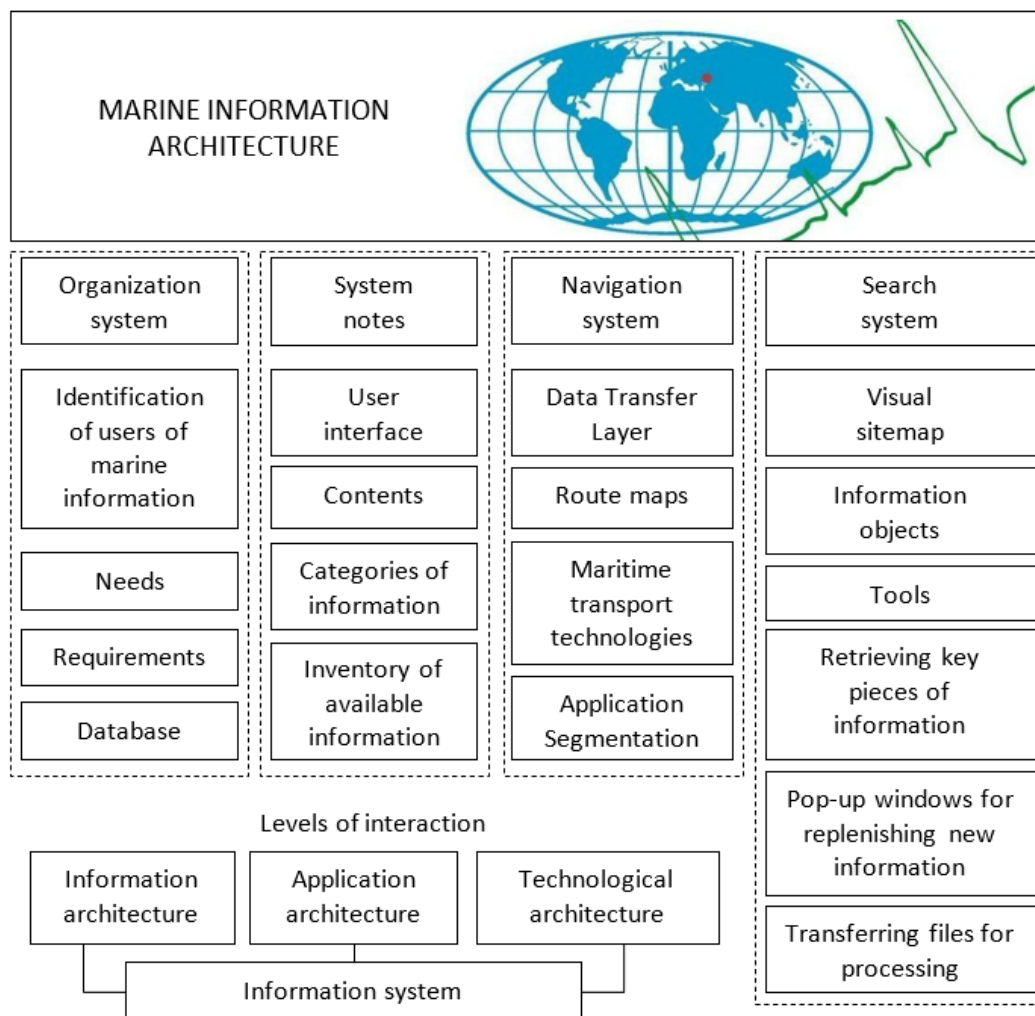


Fig. 5 – Visual representation of the information architecture of maritime transport logistics

Conclusions

1. The use of principles for constructing transport and logistics systems in information architecture provides the ability to adjust management decisions to improve the efficiency of transportation according to developed and agreed plans. The development of transport and logistics systems of information architecture allows for a deeper understanding of the complex interactions of elements within the system, an assessment of the degree of influence of factors, and the identification of bottlenecks.

2. The categorization of content in the proposed information architecture scheme, performed according to the structural and functional feature using element-by-element and resource approaches, allows for the improvement of scientific and methodological provisions for the processes of implementing transportation, the formation of a set of organizational measures, and the development of simulation models of transportation.

References

- [1] L.M. Achkasova, «Mistse i rol transportnoi lohistyky u zahalnoi lohistychnii skhemi» [«Place and role of transport logistics in the general logistic system»], *Ekonomika transportnoho kompleksu – Economics of the transport complex*, vol. 30, pp. 77-86, 2017. (Ukr.)
- [2] O.A. Hodoskina, V.D. Anasovich, and A.I. Hilkevich, «Rol transportnoi lohistyky u diialnosti promyslovoho pidpriemstva» [«The role of transport logistics in the activities of industrial enterprises»], *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, № 2(80), pp. 49-58, 2019. doi: 10.15802/stp2019/164942. (Ukr.)
- [3] O.P. Kirkin, V.I. Kirkina, and T.Y. Kirkina, «Novie analytycheskye metody upravleniya transportnyimi potokamy na baze systemnykh yssledovanyi v lo-histyke» [«New analytical techniques for traffic management on the basis of system studies in logistics»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho*

universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, vol. 34, pp. 209-216, 2017. (Ukr.)

- [4] M.V. Sharko, *Upravlenye razvytyem ynnovatsyi v promyshlennom proizvodstve: monohrafiya* [Management of Innovation Development in Industrial Production: Monograph]. Kherson, Ukraine: KhNTU Publ., 2010. (Rus.)
- [5] P. Leviakangas, J. Haajanen, and A.-M. Alaruikka, «Information service architecture for international multimodal logistic corridor», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8(4), pp. 565-574, 2007. doi: **10.1109/TITS.2007.903049**.
- [6] W. Fan, J. Gu, H. Wang, and Z. Cheng, «Research of international logistics information platform based on soa», in Proceedings of the 12th COTA International Conference of Transportation Professionals «Multimodal Transportation Systems – Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient», Beijing, China, 2012, pp. 1965-1974. doi: **10.1061/9780784412442.200**.
- [7] M. Wang, Y. Wei, X. Huang, and S. Gao, «An End-to-End Deep Reinforcement Learning Framework for Electric Vehicle Routing Problem», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11(20), pp. 33671-33682, 2024. doi: **10.1109/JIOT.2024.3432911**.
- [8] A. Buchmann et al, «Event-driven services: Integrating production, logistics and transportation», *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 6568, pp. 237-241, 2011. doi: **10.1007/978-3-642-19394-1_26**.
- [9] A. Baumgrass, C. Cabanillas, and C. Di Ciccio, «A conceptual architecture for an event-based information aggregation engine in smart logistics», *Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings – Series of the Gesellschaft für Informatik (GI)*, vol. 248, pp. 109-123, 2015.
- [10] X.-L. Ma, and L.-D. Zhao, «Research on architecture of transportation monitor management system based on event driven theory», in Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, China, 2007, article 4341389, pp. 6570-6573. doi: **10.1109/WICOM.2007.1614**.
- [11] C. He, T. Yang, T. Duhan, Y. Wang, and G. Sartoretti, «ALPHA: Attention-based Long-horizon Pathfinding in Highly-structured Areas», in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Yokohama, Japan, 2024, pp. 14576-14582. doi: **10.1109/ICRA57147.2024.10611301**.
- [12] H. Wang, and W. Liu, «A study of the integrated transportation and logistics information platform of Yangtze River Delta», in Proceedings of the 2nd Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System, Beijing, China, 2010, vol. 2, article 5626592, pp. 190-193.
- [13] S. Sicari, A. Rizzardi, and A. Coen-Porisini, «How to evaluate an Internet of Things system: Models, case studies, and real developments», *Software – Practice and Experience*, vol. 49(11), pp. 1663-1685, 2019. doi: **10.1002/spe.2740**.
- [14] L. Li, and Z. Zheng, «Construction of Logistics Distribution Information Sharing Platform Based on Internet of Things Technology», *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 134, pp. 387-397, 2022. doi: **10.1007/978-3-031-04812-8_33**.
- [15] P.B.M. Fahim, R. An, J. Rezaei, Y. Pang, B. Montreuil, and L. Tavasszy, «An information architecture to enable track-and-trace capability in Physical Internet ports», *Computers in Industry*, vol. 129, article 103443, 2021. doi: **10.1016/j.compind.2021.103443**.
- [16] C. Xie, and S.T. Deng, «The Design and Implementation of Logistics Information System based of Multi-tier Architecture», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1087(4), article 042034, 2018. doi: **10.1088/1742-6596/1087/4/042034**.
- [17] P. Louda, A. Sharko, D. Stepanchikov, and A. Sharko, «Experimental and theoretical study of plastic deformation of epoxy coatings on metal substrates using the acoustic emission method», *Materials*, vol. 15(11), article 3791, 2022. doi: **10.3390/ma15113791**.
- [18] O.V. Sharko, and P.V. Movchan, «Information architecture concept maritime transport logistics information architecture in conditions of uncertainty», *Naukoiemni tekhnolohii – Science-Based Technologies*, vol. 65, № 1, pp. 125-132, 2025. doi: **10.18372/2310-5461.65.19933**.
- [19] P. Louda, V. Marasanov, A. Sharko, D. Stepanchikov, and A. Sharko, «The theory of similarity and analysis of dimensions for determining the state of operation of structures under difficult loading conditions», *Materials*, vol. 15(3), article 1191, 2022. doi: **10.3390/ma15031191**.
- [20] F. Liu, H. Ning, H. Yang, Z. Xu, and Y. Cong, «RFID-based EPC system and information services in intelligent transportation system», in Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications, Chengdu, China, 2006, article 4068521, pp. 26-28. doi: **10.1109/ITST.2006.288752**.
- [21] O. Sharko, A. Buketov, K. Klevtsov, O. Sapronov, and O. Akimov, «Modeling of transport and logistics schemes of freight transportation under global risks», *Problems of friction and wear*, № 3(100), pp. 94-105, 2023. doi: **10.18372/0370-2197.3(100).17899**.

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ АРХІТЕКТУРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Шарко О.В.

д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-7990>, e-mail: avssharko@gmail.com;

Мовчан П.В.

аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1004-6651>, e-mail: mpv01121988@gmail.com

У статті розглянуто змістовні характеристики інформаційної архітектури транспортної логістики як засобу орієнтації на веб-сайтах з використанням відповідних інтерфейсів та діалогових вікон. Наведено логістичний та фізичний описи інформаційного забезпечення транспортних операцій. Запропоновано схему інформаційної архітектури транспортної логістики для складних перевезень, що здійснюються в умовах невизначеності зовнішніх впливів середовища та ризику. Інформаційна архітектура транспортної логістики побудована за структурно-функціональною організаційною ознакою, що дозволяє формувати групи інформаційних об'єктів на основі розуміння кінцевих потреб, закономірностей сприйняття та особливостей транспортної логістики. Відмінною особливістю запропонованої схеми є категоризація модулів інформаційної архітектури у певному форматі та її адаптивність до зовнішнього середовища. Використання інформації в запропонованій схемі виділяє наступні компоненти: наявність пріоритетів у застосуванні вхідної інформації та програмно-технічних засобів, розташування та ранжування допоміжних підсистем за їх важливістю у прийнятті рішень щодо умов транспортування, координація взаємодій, наявність зв'язків логічної підпорядкованості між елементами схеми, чергування та послідовність функціональних процедур, координація цілей і взаємодій, своєчасна передача інформації, розробка методик усунення невизначеності. Запропоновано логістичну математичну модель інформаційної архітектури транспортних перевезень, інформаційну структуру та імітаційну модель управління в умовах невизначеності, що включає взаємозв'язки між цілями, альтернативними засобами їх досягнення та наявними ресурсами. Використання основних теоретичних принципів та організаційно-методичних положень під час створення блоків інформаційної архітектури забезпечує можливість коригування управлінських рішень для підвищення ефективності перевезень за розробленими та узгодженими планами. Розробка транспортно-логістичних систем інформаційної архітектури дозволяє глибше зрозуміти складні взаємодії елементів усередині системи, оцінити ступінь впливу факторів, виявити вузькі місця. Науковий напрям цього аспекту включає методи теорії вибору, експертних систем, імітаційного моделювання, марківських процесів, динамічного програмування, теорії ігор нечіткої логіки. Всі вони пов'язані з багатокритеріальними оцінками поточної ситуації та мають у досягненні альтернативних варіантів керування транспортними перевезеннями елементи ризику.

Ключові слова: інформаційна архітектура, транспортна логістика, транспортування, структурні схеми, функціональний підхід, невизначеність.

Перелік використаних джерел

- [1] Ачкасова Л.М. Місце і роль транспортної логістики у загальній логістичній схемі. *Економіка транспортного комплексу*. 2017. Вип. 30. С. 77-86.
- [2] Ходоскіна О.А., Анасовіч В.Д., Хількевич А.І. Роль транспортної логістики у діяльності промислового підприємства. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2019. № 2(80). С. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/164942>.
- [3] Киркин А.П., Киркина В.И., Киркина Т.Ю. Новые аналитические методы управления транспортными потоками на базе системных исследований в логистике. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. Вип. 34. С. 209-216.
- [4] Шарко М.В. Управление развитием инноваций в промышленном производстве: монография. Херсон: ХНТУ, 2010. 459 с.
- [5] Leviakangas P., Haajanen J., Alarukka A.-M. Information service architecture for international multimodal logistic corridor. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2007. Vol. 8(4). Pp. 565-574. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2007.903049>.
- [6] Research of international logistics information platform based on soa / Fan W., Gu J., Wang H., Cheng Z. *CICTP 2012: Multimodal Transportation Systems – Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient: Proceedings of the 12th COTA International Conference of Transportation Professionals*, Beijing, China, 3-6 August 2012. Pp. 1965-1974. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412442.200>.
- [7] An End-to-End Deep Reinforcement Learning Framework for Electric Vehicle Routing Problem / Wang M., Wei Y., Huang X., Gao S. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11(20). Pp. 33671-33682. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2024.3432911>.
- [8] Event-driven services: Integrating production, logistics and transportation / A. Buchmann et al. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes*

- in *Bioinformatics*). 2011. Vol. 6568. Pp. 237-241. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19394-1_26.
- [9] Baumgrass A., Cabanillas C., Di Ciccio C. A conceptual architecture for an event-based information aggregation engine in smart logistics. *Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings – Series of the Gesellschaft für Informatik (GI)*. 2015. Vol. 248. Pp. 109-123.
- [10] Ma X.-L., Zhao L.-D. Research on architecture of transportation monitor management system based on event driven theory. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, China, 21-25 September 2007. Article 4341389. Pp. 6570-6573. DOI: <https://doi.org/10.1109/WICOM.2007.1614>.
- [11] ALPHA: Attention-based Long-horizon Pathfinding in Highly-structured Areas / C. He et al. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Yokohama, Japan, 13-17 May 2024. Pp. 14576-14582. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10611301>.
- [12] Wang H., Liu W. A study of the integrated transportation and logistics information platform of Yangtze River Delta. *2nd Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System*, Beijing, China, 1-2 August 2010. Vol. 2. Article 5626592. Pp. 190-193.
- [13] Sicari S., Rizzardi A., Coen-Porisini A. How to evaluate an Internet of Things system: Models, case studies, and real developments. *Software – Practice and Experience*. 2019. Vol. 49(11). Pp. 1663-1685. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.2740>.
- [14] Li L., Zheng Z. Construction of Logistics Distribution Information Sharing Platform Based on Internet of Things Technology. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 134. Pp. 387-397. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_33.
- [15] An information architecture to enable track-and-trace capability in Physical Internet ports / P.B.M. Fahim et al. *Computers in Industry*. 2021. Vol. 129. Article 103443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103443>.
- [16] Xie C., Deng S.T. The Design and Implementation of Logistics Information System based of Multitier Architecture. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1087 (4). Article 042034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042034>.
- [17] Experimental and theoretical study of plastic deformation of epoxy coatings on metal substrates using the acoustic emission method / Louda P., Sharko A., Stepanchikov D., Sharko A. *Materials*. 2022. Vol. 15(11). Article 3791. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15113791>.
- [18] Sharko O.V., Movchan P.V. Information architecture concept maritime transport logistics information architecture in conditions of uncertainty. *Наукоємні технології*. 2025. Том 65, № 1. С. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.65.19933>.
- [19] The theory of similarity and analysis of dimensions for determining the state of operation of structures under difficult loading conditions / P. Louda et al. *Materials*. 2022. Vol. 15(3). Article 1191. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15031191>.
- [20] RFID-based EPC system and information services in intelligent transportation system / F. Liu et al. *6th International Conference on ITS Telecommunications*, Chengdu, China, 21-23 June 2006. Article 4068521. Pp. 26-28. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITST.2006.288752>.
- [21] Modeling of transport and logistics schemes of freight transportation under global risks / O. Sharko et al. *Problems of friction and wear*. 2023. № 3(100). Pp. 94-105. doi: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17899](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17899).

Стаття надійшла 17.03.2025

Стаття прийнята 12.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Sharko O., Movchan P. Modeling of information architecture and information support of transportation in conditions of uncertainty. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 297-307. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336474>.