

**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 52

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 52

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. 52. 255 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025>.

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.

Погорлецкий Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пятикоп О.Є.

Саенко 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., КрНУ ім. Михайла Остроградського, Україна

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

д-р техн. наук, проф., Національний університет «Чернігівська політехніка», 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, 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-

логії, 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.pgutu@gmail.com, vestnik_pgutu@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.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 6 від 29.12.2025 р.

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

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

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

**Кривенко О.В., Балалаєва О.Ю.,
Кучеренко О.М.**

Створення 3D-моделі драматичного театру міста Маріуполя для збереження історичної пам'ятки та культурної спадщини України

7

**O. Kryvenko, O. Balalaieva,
O. Kucherenko**

Creating a 3D model of the Mariupol Drama Theatre to preserve a historical landmark and the cultural heritage of Ukraine

Сергієнко А.В., Волобуєв Є.С.

Дослідження використання генетичних алгоритмів для автоматизованого проектування ударостійких поверхонь

25

A.V. Sergienko, Y.S. Volobuiev

Research into the use of genetic algorithms for automated design of impact-resistant surfaces

Ситник М.В., Піднебесна Г.А.

Інтелектуальна система багатокритеріального вибору комплектуючих на основі динамічного алгоритму Сааті

33

M.V. Sytnyk, H.A. Pidnebesna

Intelligent system for multi-criteria component selection based on dynamic Saaty algorithm

**Сиротенко О.Г., Петрова Р.В.,
Морозова А.І.**

Методи машинного навчання як інструмент аналізу темпів кар'єрного розвитку співробітників ІТ-компанії

39

**O.G. Syrotenko, R.V. Petrova,
A.I. Morozova**

Machine learning methods as a tool for analysing the career development pace of IT company employees

**Казаченко О.Г., П'ятикоп О.Є.,
Носовська С.Є.**

Кластерний аналіз та прогнозування пошукових запитів для побудови інтелектуальної системи моніторингу попиту на медичні ліцензії

48

**O.H. Kazachenko, O.Ye. Piatykor,
S.Ye. Nosovska**

Cluster analysis and search query forecasting for building an intelligent system for monitoring demand for medical licenses

Білявенко А.В., Коваленко О.С.

Методи Data Mining та машинне навчання як засоби аналізу стану пацієнтів та ускладнень захворювань за клінічними даними

55

L.V. Biliavenko, O.S. Kovalenko

Data Mining methods and machine learning as tools for analyzing patient conditions and disease complications based on clinical data

**Куцяк О.А., Пезенцалі Г.О.,
Кріщанович М.Ю.**

Проектування інформаційної системи діагностування рухової активності «MTest»

64

**O.A. Kutsiak, H.O. Pezentsali,
M.Yu. Krishchanovych**

Information system for diagnosing motor activity «MTest» design

Проніна О.І., Рейжевський М.І.

Розробка програмного забезпечення генерації мережевого трафіку в комп'ютерних мережах для задач кібербезпеки

75

O.I. Pronina, M.I. Reizhevskiy

Development of software for network traffic generation in computer networks for cybersecurity tasks

**Левицька Т.О., Копійка О.С.,
Пилипенко Б.В.**

Захист даних і безпека моделей машинного навчання в ринково-нейтральних стратегіях крипторейдингу

83

**T.O. Levytska, O.S. Kopyika,
B.V. Pylypenko**

Data protection and security of machine learning models in market-neutral cryptocurrency trading strategies

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

Chabak Yu.G., Sili I.I., Efremenko B.V., Stavrovskaia V.E., Sagirov R.I., Efremenko V.G.

Stabilization of low-temperature impact toughness in heavy structural steel plates by adjusting normalizing rolling parameters

93

Yu.G. Chabak, I.I. Sili, B.V. Efremenko, V.E. Stavrovskaia, R.I. Sagirov, V.G. Efremenko

Stabilization of low-temperature impact toughness in heavy structural steel plates by adjusting normalizing rolling parameters

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

Таратута К.В.

Оцінка впливу масштабного фактору на руйнування прямокутних профілів при волочінні з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема

102

K.V. Taratuta

Assessment of the influence of the scale factor on the destruction of rectangular profiles during drawing using the normalized Cockcroft-Latham criterion

Пантейков С.П.

Підвищення безпеки експлуатації конструкторських головок для верхніх конвертерних фурм

114

S.P. Panteikov

Enhancing the operational safety of tip designs for top converter lances

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Сасенко Ю.А., Любарцев В.В.

Удосконалення прогнозування електричних навантажень у мережах із розподіленою генерацією за допомогою нейронних мереж

124

Yu. Sayenko, V. Liubartsev

Improvement of electric load forecasting in distributed generation networks using neural networks

Семенов А.О., Семенова Н.В.

Розробка електротехнічної системи УФ-дезінфекції води для рециркуляційних аквакультурних установок

132

A.O. Semenov, N.V. Semenova

Development of an electrotechnical system for UV water disinfection in recirculating aquaculture systems

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES

Кравченко В.П., Койфман О.О., Сімкін О.І., Мірошниченко В.І.

Керування групою повітрянагрівачів доменної печі під час паралельної роботи на дутті двох повітрянагрівачів

140

V.P. Kravchenko, O.O. Koufman, O.I. Simkin, V.I. Miroshnychenko

Control of hot blast stove group during parallel blast operation of two stoves

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА****ENVIRONMENTAL PROTECTION
TECHNOLOGY****Волошин В.С., Азархов О.Ю.**

Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища

151

V.S. Voloshyn, A.Yu. Azarkhov

Entropy factor in the manifestation of properties of organic and inorganic systems on the border of coexistence between man and the environment

Копаниця О.Б.

Діагностика та контроль спухання активного мулу на біологічних очисних спорудах

158

O.B. Kopanytsia

Diagnosis and control of activated sludge bulking at biological wastewater treatment plants

Покшевніцька Т.В.

Закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів

166

T.V. Pokshevnytska

Regularities of anthropogenic pollution of water resources

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА**CIVIL SECURITY****Цопа В.А., Чеберячко С.І.,
Дерюгін О.В., Шароватова О.П.**

Аналіз причин та особливостей керування ризиками у надзвичайних ситуаціях

174

**V. Tsopa, S. Cheberyachko,
O. Deryugin, O. Sharovatova**

Analysis of reasons and features of risk management in emergency situations

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ**RIVER AND SEA TRANSPORT****Бурлаченко Д.А., Мельник О.М.,
Пастернак О.Я., Пуляєв І.О.,
Чеча О.П.**

Динамічна модель прогнозування ризику для автономних суден з врахуванням невизначеності та стійкості систем управління

186

**D. Burlachenko, O. Melnyk,
O. Pasternak, I. Pulyaev,
O. Checha**

Dynamic model of risk prediction for autonomous vessels taking into account uncertainty and stability of control systems

Лесневський В.М., Калініченко Є.В.

Аналіз сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден

197

V.M. Lesnevskiy, Y.V. Kalinichenko

Analysis of current approaches to identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering

Гончарук І.П.

Методичні основи формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден

205

I.P. Honcharuk

Methodological basis for the formation of a subsystem for monitoring ship machinery as part of a system for the comprehensive reduction of energy losses in merchant ships

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**RAILWAY TRANSPORT****Fomin O., Lohvinenko O.A.,
Vorokh A.O., Lutsenko O.A.**

Structural analysis of compressors of traction and multiple unit rolling stock

214

**O. Fomin, O.A. Lohvinenko,
A.O. Vorokh, O.A. Lutsenko**

Structural analysis of compressors of traction and multiple unit rolling stock

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

**Худяков І.В., Грицук І.В.,
Погорлецький Д.С., Дзигар А.К.,
Аксьонова О.О.**

Аналіз методів діагностування паливної
апаратури автотракторних дизелів і
розробка математичної моделі палив-
ного насосу високого тиску

222

**I.V. Khudiakov, I.V. Gritsuk,
D.S. Pohorletsky, A.K. Dzygar,
O.O. Aksonova**

Analysis of methods for diagnosing fuel
equipment of auto tractor diesel engines
and development of a mathematical model
of a high-pressure fuel pump

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
(ЗА ВИДАМИ)**

**TRANSPORT TECHNOLOGIES
(BY TYPES)**

Кириллова О.В., Ромах В.Л.

Концептуальна модель інтегрованого
сухого порту: системне бачення у триа-
ді «hinterland-seaport-foreland»

229

O.V. Kyryllova, V.L. Romakh

Conceptual model of an integrated dry
port: a systemic vision in the triad «hinter-
land-seaport-foreland»

Zhyshchynskiy Y.S., Sharko O.

Multimodal transportation risk modeling in
Ukraine

244

Y.S. Zhyshchynskiy, O. Sharko

Multimodal transportation risk modeling in
Ukraine

ДО УВАГИ АВТОРІВ

255

INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.92:069:904

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.350944

СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ ДРАМАТИЧНОГО ТЕАТРУ МІСТА МАРІУПОЛЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІСТОРИЧНОЇ ПАМ'ЯТКИ ТА КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ УКРАЇНИ

Кривенко О.В.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2860-6575 , e-mail: krivenko_o_v@pstu.edu ;
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 ;
Кучеренко О.М.	бакалавр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: kucherenko_o_m@students.pstu.edu

Стаття присвячена створенню 3D-моделі Донецького академічного обласного драматичного театру в Маріуполі, зруйнованого внаслідок бойових дій. У зв'язку із загрозою знищення українських архітектурних пам'яток, збереження культурної спадщини шляхом цифрового моделювання набуває критичного значення. Проведено аналіз існуючих досліджень та проєктів, спрямованих на 3D-документування театру, зокрема робіт Center for Spatial Technologies (CST), Forensic Architecture, Skeiron тощо. Визначено, що основними методами, що використовувалися в даних проєктах, були методи фотограмметрії, 3D-сканування на прикладі ідентичних театрів та OSINT для реконструкції як екстер'єру, так і інтер'єру театру до та після руйнувань. Основними викликами при моделюванні зруйнованого об'єкта були обмеженість та низька якість доступних історичних даних, що ускладнює відтворення дрібних архітектурних деталей. У роботі детально описано процес створення 3D-моделі за допомогою програмного забезпечення Blender. Для моделювання використовувалися наявні фото- та відеоматеріали, а також архівні креслення. Робота включала послідовне відтворення фронтальної, бокових та задньої частин будівлі, включаючи колони, вікна, двері та дах. Особлива увага була приділена моделюванню інтер'єру театральної зали та сцени, де за кресленнями та фотографіями було відтворено понад 400 крісел, розташованих рядами. Для досягнення реалістичності використовувалися шейдери Blender (Principled BSDF, Glass, Emission) та вузли Shader Editor для накладання текстур на матеріали (цегла, дерево, метал, скло), що дозволило додати об'єму та ідентифікувати елементи на однотонному фоні. Створена 3D-модель є важливим інструментом для збереження історичної пам'яті та демонстрації масштабу трагедії в Маріуполі. Модель може бути використана для майбутнього відтворення будівлі, віртуальних виставок або 3D-друку мініатюр.

Ключові слова: 3D-моделювання, 3D-модель, Маріупольський драматичний театр, архітектурна пам'ятка, Blender.

Постановка проблеми

У зв'язку із загрозою знищення архітектурних пам'яток України під час бойових дій збереження культурної спадщини набуває першочергового значення. Одним з таких об'єктів є Донецький академічний обласний драматичний театр у Маріуполі, який, не дивлячись на руйнування, залишається знаковою культурною установою з глибокою історією. Маріупольський драмтеатр, побудований між 1956 та 1960 роками, був єдиним професійним театром у місті та одним із найстаріших на Лівобережній Україні. Будівля театру була спроектована в стилі радянського монументального класицизму українськими архітекторами Олександром Криловою та Олегом Малишенком [1]. Хоча він був побудований за типовим проєктом, за яким також були побудовані музично-драматичні театри в Полтаві, Чернігові та Херсоні, драматичний театр в Маріуполі мав унікальні особливості. На відміну від інших театрів,

які зазвичай розташовувалися на площах чи уздовж проспектів, Маріупольський драмтеатр був побудований на осі проспекту посеред скверу, що створювало форму площі. Крім того, цей театр вирізняв унікальний фасад, який був значно перероблений і містив оригінальну скульптурну композицію у тимпані фронтона.

У 1983 театр отримав статус пам'ятки архітектури. З 2016 року він носила назву Донецький академічний обласний драматичний театр. Маріупольський драматичний театр функціонував до весни 2022 року, до моменту бойових дій, при цьому до того часу будівля театру зберігала оригінальну форму, обличчювання стін, а також декоративне оздоблення як фасадів, так і інтер'єру. Крім того, незмінними залишалися параметри приміщень, конструкції та матеріали, використані для входів, малюнок та матеріал підлоги, освітлювальна арматура тощо [1]. 16 березня 2022 року будівля

театру була зруйнована, особливо постраждала центральна частина, яка була повністю знищена [2].

Одним з ефективних інструментів збереження даних про архітектурні пам'ятки є 3D-моделі, які надалі можуть бути використані для реставрації або повного відтворення будівель у разі їх пошкодження чи знищення, як це сталося з Маріупольським драматичним театром. Тривимірні моделі дозволяють створити точну цифрову копію об'єкта, фіксуючи його форму, структуру, розміри, деталі оздоблення та матеріали. Створення 3D-моделей під час війни – це критично важливий захід для збереження культурної ідентичності та історичної пам'яті.

Мета статті

Метою даної роботи є створення 3D-моделі Маріупольського драматичного театру як важливого елементу культурної спадщини України з метою збереження пам'яті про втрачений історичний об'єкт та підвищення обізнаності про його значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Найбільш вагомий внесок у збір фото- та відеоматеріалів стосовно Донецького академічного обласного драматичного театру м. Маріуполя, а також створення його 3D-моделей зробив Центр просторових технологій (Center for Spatial Technologies – CST) у співпраці з Forensic Architecture / Forensis [3]. 3D-моделі внутрішнього простору будівлі театру ґрунтувалися на архівних кресленнях, які також наведені на сайті проєкту «Маріупольський Драмтеатр. Просторовий архів» [3] із посиланням на Державну наукову архітектурно-будівельну бібліотеку імені В.Г. Заболотного. 3D-моделі екстер'єру були побудовані у двох варіантах – до і після вибуху, при цьому для їх створення використовували методи фотограмметрії [4], які дозволяють побудуватися тривимірні моделі на основі двовимірних зображень об'єктів з різних ракурсів. Крім того, використовували методи 3D-сканування будівель, а саме Полтавського драматичного театру, який був побудований за проєктом, практично ідентичним Маріупольському драматичному театру [1].

Детальна робота була також проведена й з відеоматеріалами, які було розбито на окремі кадри та об'єднано у панорамні знімки, а також класифіковано за хронологією. Побудовані тривимірні моделі надалі було використано для «просторових свідчень» – інтерв'ю, де свідки ніби прогулювалися віртуальним простором, відтворюючи події. Крім того, проєкт дозволив локалізувати візуальні матеріали, що документують театр до та після руйнування.

3D-моделі театру від CST доступні на таких платформах, як Sketchfab, що дозволяють інтерактивно досліджувати будівлю до та після руйнування, а також її функціональні зони. Наприклад, «Mariupol Drama Theater – After russian Airstrike» [5], «Mariupol Drama

Theater» [6], «Mariupol Drama Theater – Function zones» [7].

Проєктом є «A City Within A Building: The Mariupol Drama Theatre» від Forensis та CST [8], що досліджує тритижневий період між початком бойових дій та знищенням театру – від 24 лютого до 16 березня 2022 року. Як зазначалося вище, в основу цифрової реконструкції побуло покладено 3D-сканування майже ідентичного драмтеатру в Полтаві [1] через відсутність доступу до зруйнованого драмтеатру в Маріуполі. Для збору та аналізу фотографій, відеоматеріалів та дописів із соціальних мереж використовували методи фотограмметрії, геолокації та OSINT [9], що передбачає отримання інформації з відкритих джерел.

На сайті [10] представлено інтерактивне розслідування «Theater-Shelter. Did Those Who Hid in the Mariupol Drama Theater Have a Chance to Survive?» від Zaborona та Center for Spatial Technologies Investigation. Дані матеріали використовують 3D-модель драмтеатру для візуалізації свідчень та фотографій мешканців Маріуполя. Створена візуалізація дозволяє користувачам обертати модель і натискати на відповідні номери, щоб переглянути фотографії та прочитати свідчення.

Інший проєкт – «Case Study: Modelling the Mariupol Drama Theatre Attack» від Citizen Evidence Lab [11] мав на меті створенні 3D-моделі Маріупольського драмтеатру для відтворення процесу та руйнівних наслідків бойових дій. На побудовану тривимірну модель наклали місця розташування свідків, їхні свідчення про зони найбільших пошкоджень, фото- та відеоматеріали, а також розраховували математичну модель вибухової хвилі. Розміри частин будівлі при побудові моделі в 3D визначали на основі фотографій, зроблених до руйнувань. Також використовували техніку «вирішення камери» для визначення позиції та фокусної відстані, що дозволило моделювати зовнішні деталі у правильних пропорціях. Після цього загальний масштаб було скориговано, спираючись на супутникові знімки та інші об'єкти на фотознімках, розміри яких відомі. Для моделювання внутрішніх поверхів трасували плани та екструдували стіни кожного поверху, спираючись на підказки з внутрішніх та зовнішніх фотографій, а також деталі сходів для оцінки висоти поверхів. У результаті отримано 3D-модель, яка синтезує у собі свідчення та інші докази, забезпечуючи підтвердження розташування зон пошкоджень та місць загибелі людей. Вона також була наративним та ілюстративним засобом для підтримки детального звіту.

Львівська студія Skeiron створила 3D-модель зруйнованого Маріупольського драматичного театру в рамках ініціативи #SaveUkrainianHeritage, яка спрямована на оцифрування культурної спадщини [12]. Для збору фото- та відеоматеріалів матеріалів була запущена краудфандингова кампанія, а основну частину даних для відновлення зовнішнього вигляду театру студія отримала від маріупольця Олексія Генералова, який раніше знімав Маріуполь за допомогою дрона. Для відтворення внутрішнього вигляду будівлі

використали сферичний відеотур, створений іншою мешканкою Маріуполя – Ольгою Демідко. Зазвичай студія Skeiron для оцифрування об'єктів культурної спадщини застосовує сканування з використанням геодезичних приладів, лазерних сканерів, а також дрони та фотоапарати. Однак у випадку з Маріупольським драматичним театром це виявилось неможливим через неможливість доступу до міста та руйнування будівлі, тому 3D-модель не є точною копією. Студія планує продовжити роботу з оцифрування об'єктів в Маріуполі, включаючи стару водонапірну вежу та кілька будівель навколо драмтеатру.

Таким чином, 3D-моделі стали важливим інструментом для візуалізації наслідків бойових дій, а також відтворення подій. 3D-моделі допомагають зберегти історичний запис про те, що сталося, і відновити візуальний образ зруйнованого об'єкта. Такі моделі слугують платформою для інтеграції свідчень очевидців, а також можливістю для «ситуативних інтерв'ю» в створеному цифровому просторі. Робота зі створення 3D-моделей Маріупольського драматичного театру продовжується, при цьому більшість з створених моделей доступні в інтерактивному форматі, що дозволяє широкій аудиторії проаналізувати та зрозуміти масштаби трагедії в Маріуполі.

Виклад основного матеріалу

Головні виклики при створенні 3D-моделі Донецького академічного обласного драматичного театру м. Маріуполя – забезпечення точності моделі та історична достовірність відтворення, що є достатньо складною задачею через обмеженість детальних історичних фотографій, креслень та планів театру, а також недостатньою кількістю та невисокою роздільною здатністю доступних зображень, що ускладнювало відтворення дрібних деталей. Крім того, відтворення складних архітектурних елементів, таких як ліпнина, колони, арки, вимагає високого рівня володіння програмними засобами тривимірного моделювання, а створення дуже детальної моделі може вимагати великих обчислювальних ресурсів.

Складність побудови архітектурних елементів моделі полягає в необхідності точного відтворення пропорцій та розмірів будівлі, при цьому завдання додатково передбачає створення реалістичних текстур, що відповідають матеріалам оригіналу. Недостовірне відтворення може спотворити історичну пам'ять, тому при виконанні такої роботи треба усвідомлювати свою відповідальність перед суспільством.

Для реалізації проекту було обрано Blender [13] – один з найбільш універсальних інструментів для 3D-моделювання та анімації, який є повністю безкоштовним та має відкритий вихідний код.

Для відтворення матеріалів використовували шейдери Blender: Principled BSDF, Glass, Emission, при цьому матеріали налаштовували з урахуванням фізичних властивостей архітектурних частин будівлі,

наприклад, відбиття та заломлення. Principled BSDF – універсальний шейдер, який є основою для більшості матеріалів. Він імітує широкий спектр поверхонь і при моделюванні будівлі використовується для стін (бетон, цегла, штукатурка), дерев'яних елементів (рами, двері, підлога), металеві деталі (поручні, водостоки, дах). Glass BSDF – шейдер для моделювання скла та інших прозорих, заломлюючих матеріалів, який дозволяє коректно розрахувати відбиття та заломлення світла, проходячи через поверхню. Emission – шейдер, який змушує об'єкт випромінювати світло, перетворюючи його на джерело освітлення, що дозволяє використовувати його для освітлення в інтер'єрі.

Налаштування матеріалів з урахуванням фізичних властивостей виконували через Shader Editor. Нові матеріали створювали через меню Material Properties та підключали шейдери. За замовчуванням отримували вузол Principled BSDF, а для інших матеріалів заміняли цей вузол на Glass BSDF або додали нові (наприклад, для світлих частин фасаду підключали вузол Emission до входу Emission у Principled BSDF). Для реалістичності матеріалів необхідні були текстури, тому додавали вузли Image Texture, завантажували зображення (Base Color, Roughness, Normal Map) і підключали їх до відповідних входів шейдера.

Для освітлення було використано два типи: лампа та сонце. Для рендерингу, тобто процесу перетворення 3D-моделі з комп'ютерної програми на зображення, яке буде бачити користувач, використовуються двигуни Cycles або Eevee.

Вихідні дані для створення 3D-моделі Донецького академічного обласного драматичного театру м. Маріуполя були фото та відеоматеріали, а також креслення: фронтальна частина (рис. 1а), задня частина (рис. 1б), бокова частина (рис. 2а), знімки під кутом (рис. 2б), театральна зала (рис. 3).

Першим етапом роботи над 3D-моделлю Драматичного театру було створення фронтальної частини будівлі. По-перше, найбільше інформації в інтернет-джерелах містилося саме про цю частину, а, по-друге, спираючись на неї, простіше визначити розміри інших фрагментів. У проєкт було додано фотографію фронтальної частини театру – референс (рис. 4а).

Спочатку було створено форму колони з куба, після чого додано ще три копії колон та розташовано по відповідних місцях на референсі (рис. 4б). Далі теж з куба було створено частину стіни, яка спирається на колони та має невеликий навіс, при цьому враховано, що дана частина стіни йде по всьому периметру театру (рис. 4в). Наступним кроком було додано нижню частину колон, яка плавно переходить у сходи та нижню частину будівлі на наступних етапах (рис. 5а). Далі дороблено стіну з фронтального ракурсу по боках від крайніх колон (рис. 5б). Після цього створено сходи (рис. 5в) та від основи колон зроблено нижню частину театральних стін, яка в оригіналі є чорного кольору та виглядає як окантовка будівлі (рис. 5г).

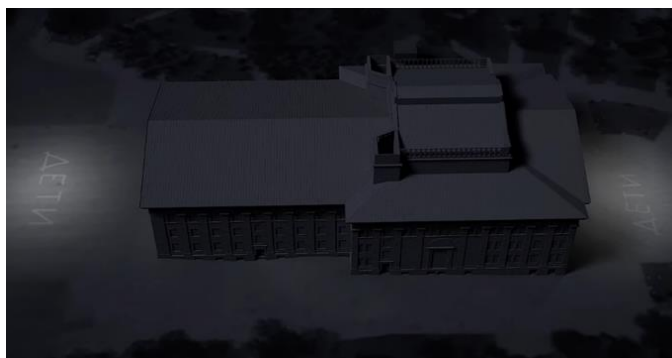


(a)



(б)

Рис. 1 – Фотографія фронтальної частини театру (а), фотографія задньої частини театру з гугл-мап за авторством Андрія Чабана



(a)



(б)

Рис. 2 – Фрагмент з відео про модель театру за описом від свідків (а), знімок театру під кутом з дрону (б)

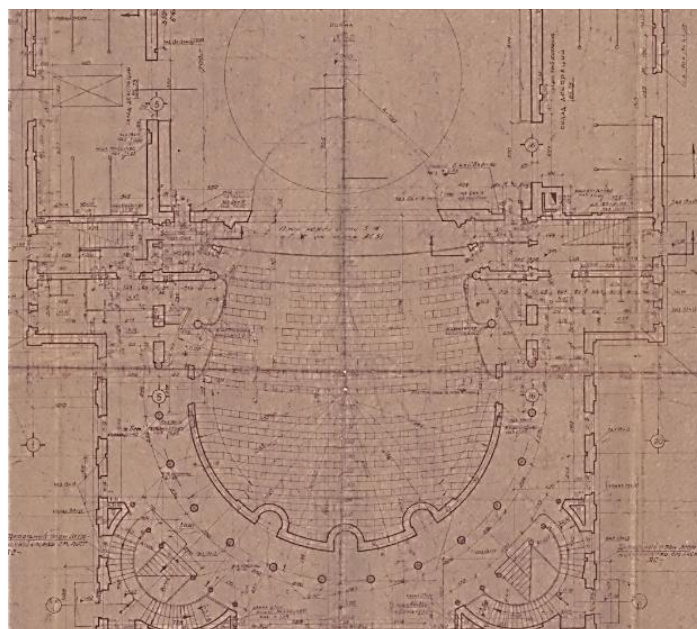
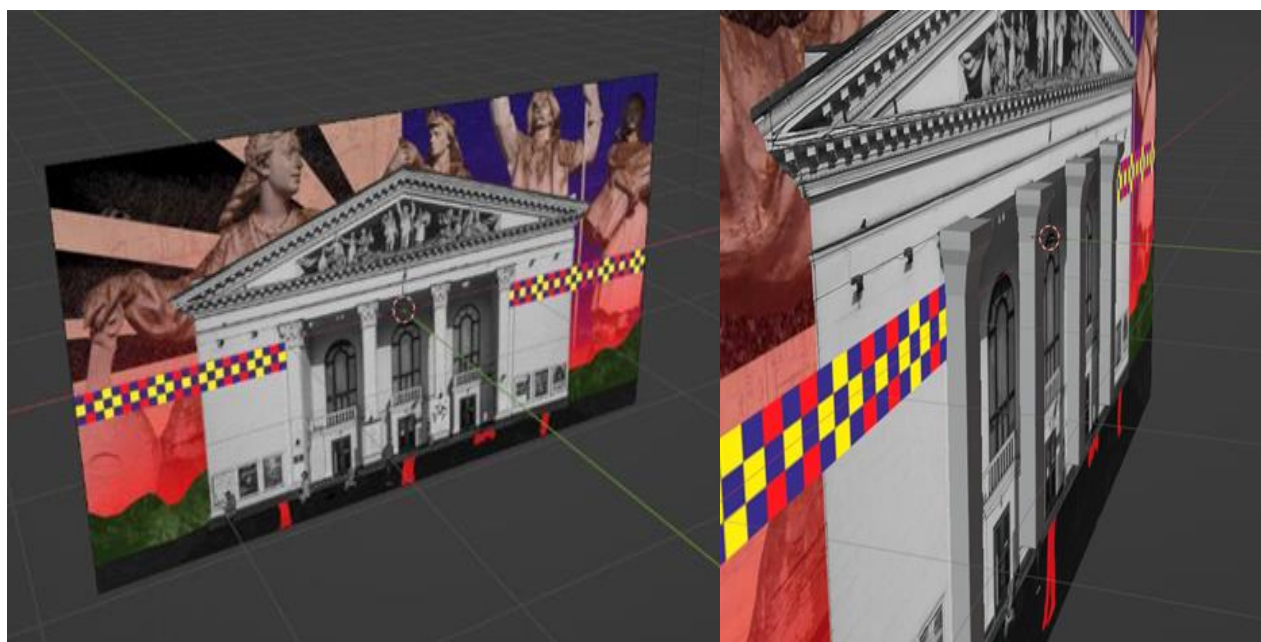


Рис. 3 – Креслення театральної зали

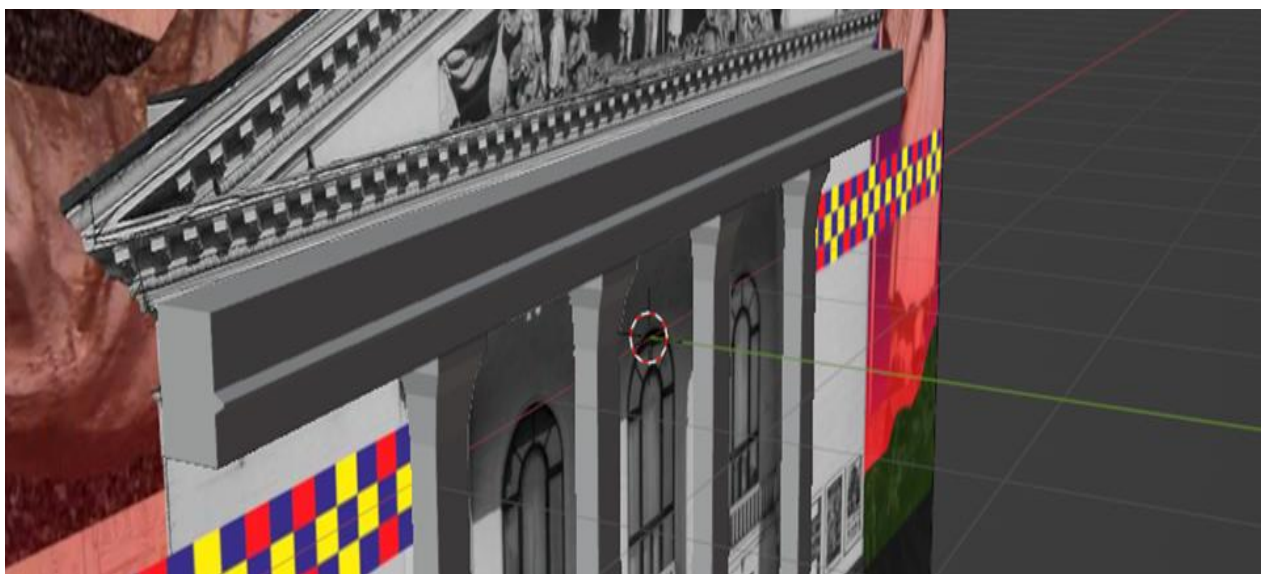
Наступним кроком було створення трьох вхідних дверей та балконів над ними, що потребувало зусиль для точного визначення розмірів (рис. 6а, б). Останній фрагмент – це створення форми даху, кутів нахилу та

розміру (рис. 7а), при цьому опрацювання його деталей буде розглянуто на наступних етапах роботи над 3D-моделлю.



(а)

(б)



(в)

Рис. 4 – Референс фронтальної частини театру (а), колон (б) та частини стіни з навісом (в)

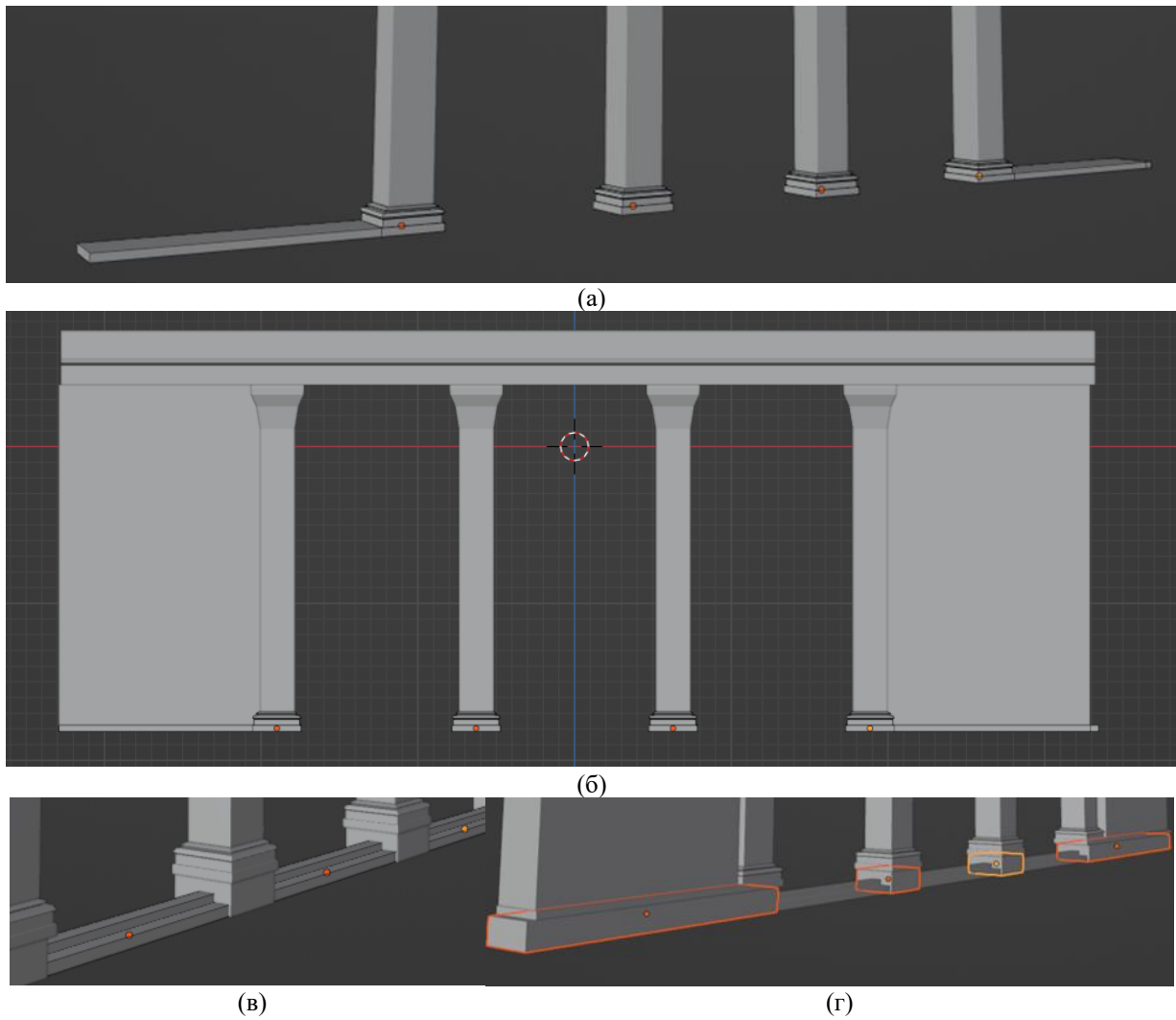


Рис. 5 – Створення основи колон (а), основних передніх стін (б), сходів (в) та нижньої частини стіни (г)

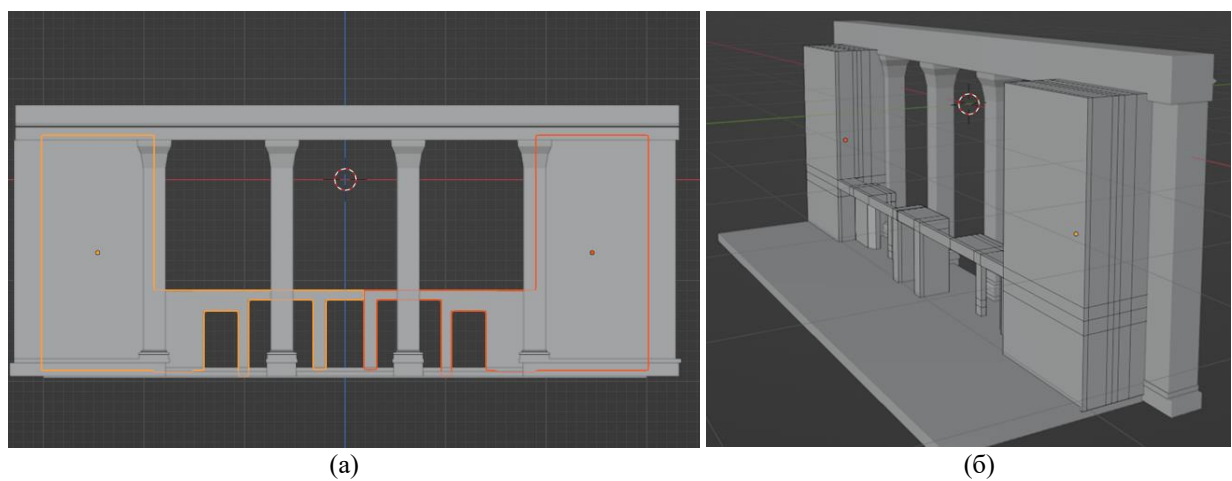
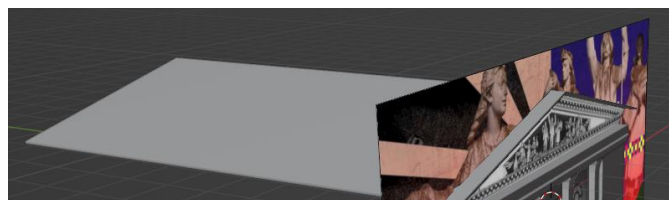


Рисунок 6 – Вхід: вид спереду (а) та зсередини (б)

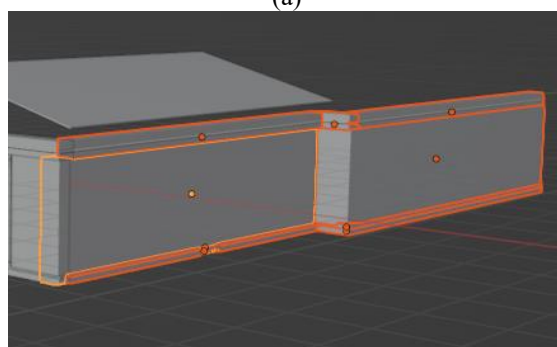
Другим етапом роботи над 3D-моделлю Драматичного театру було моделювання найдовшої частини будівлі, яка складається з двох ділянок, одна з яких має відношення до фронтальної частини, а інша – до задньої частини театру.

Було виміряно довжину стін відносно фронтальної частини театру за фотографією, після чого побудовано їх з'єднання (рис. 7б).

Далі на стінах було створено вікна, при цьому верхні вікна мають більші підвіконня, ніж на першому та другому поверсі (рис. 8а). Було додатково враховано, що у середньому стовпці (п'ятому) проходять вікна між сходами, тому вони мають іншу висоту, а також наявні двері для входу (рис. 8б).

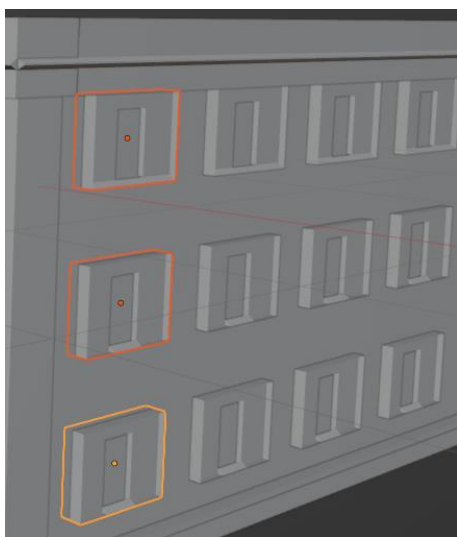


(а)

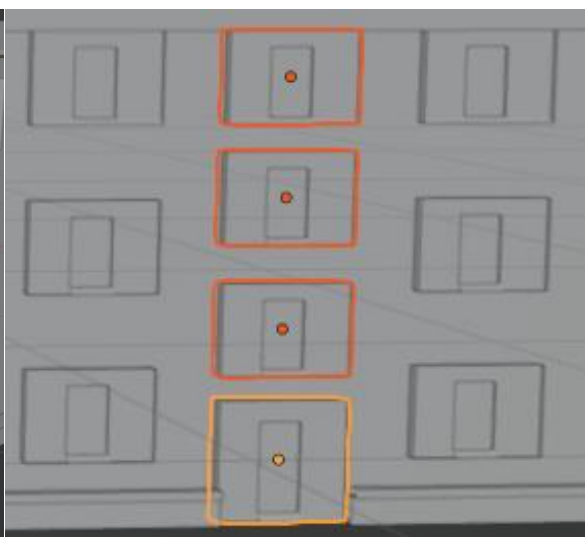


(б)

Рис. 7 – Початок створення даху (а) та створення бокових стін (б)



(а)



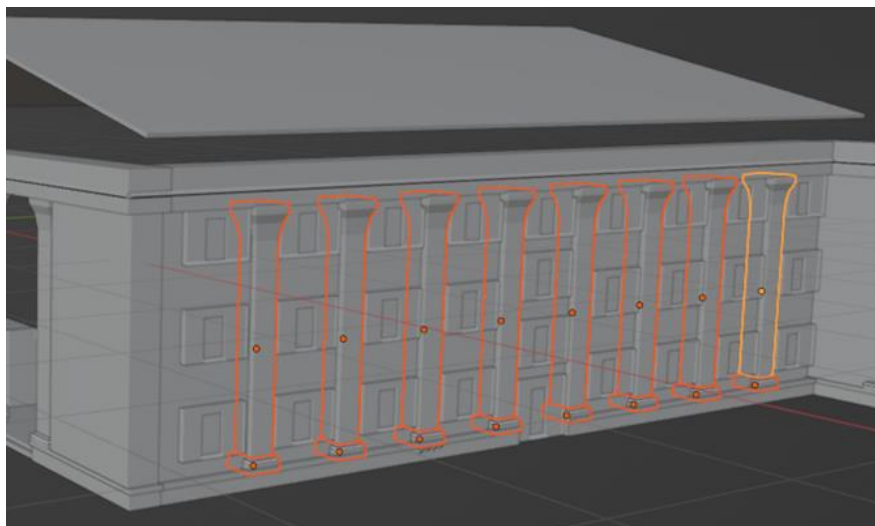
(б)

Рис. 8 – Створення вікон на першому, другому та третьому поверхах (а), а також вікон та дверей між сходами (б)

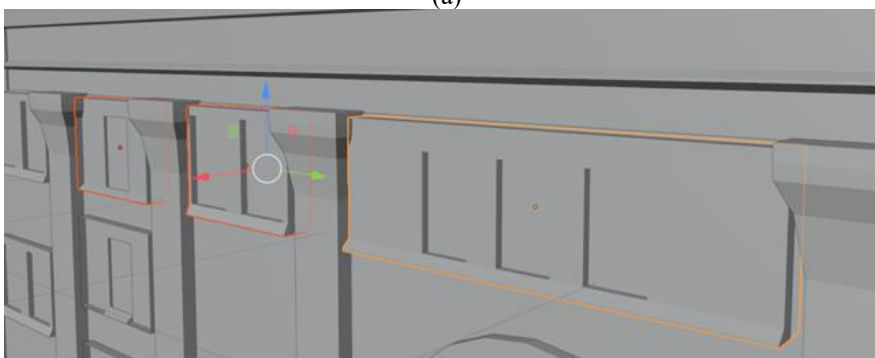
Між кожним стовпцем вікон розміщено колони, які аналогічні до колон на передній частині будівлі та розташовані вони впритул до країв вікон (рис. 9а). На стіні, яка прилягає до задньої частини будівлі, вікон менше, але вони складніші за попередні, бо іноді є

подвійними та потрійними (рис. 9б).

Близько до передньої частини стіни розташовані двері, аналогічні до попередніх дверей (рис. 10а), а також є великі ворота для ввезення речей на склад з аркою над ними (рис. 10б).

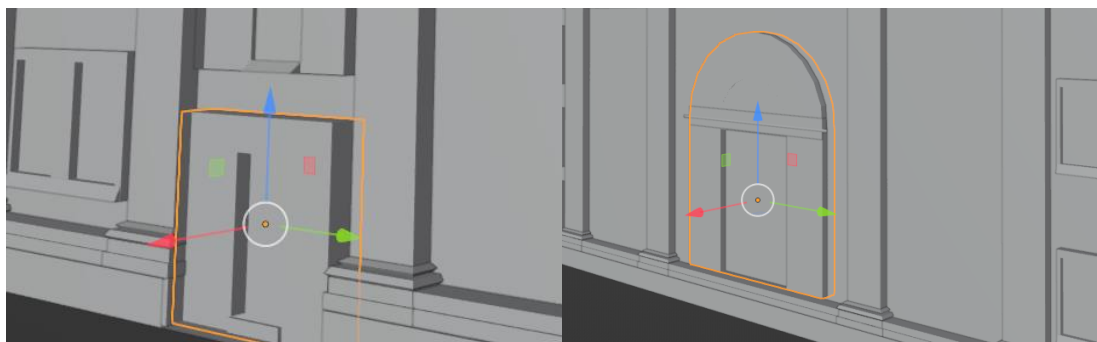


(a)



(б)

Рис. 9 – Створення колон на бокових стінах (а) та вікон бокової задньої стіни



(a)

(б)

Рис. 10 – Двері до сходів (а) та ворота на склад (б)

Другим етапом роботи над 3D-моделлю є створення задньої частини театру, при переході до якої є звуження від бокових стін в формі букви Г (рис. 11а). Задня та фронтальна стіни мають однакові розміри й, незважаючи на схожість в окремих елементах, містять багато різних деталей. Задня частина має майже

чотири десятки вікон різної форми та окремі маленькі квартирки. При побудові тривимірної моделі застосовували чотири види вікон, які відрізняються кількістю скла та розмірами (рис. 11б). Також наявні три однакові двері по боках та в центрі стіни (рис. 11в).

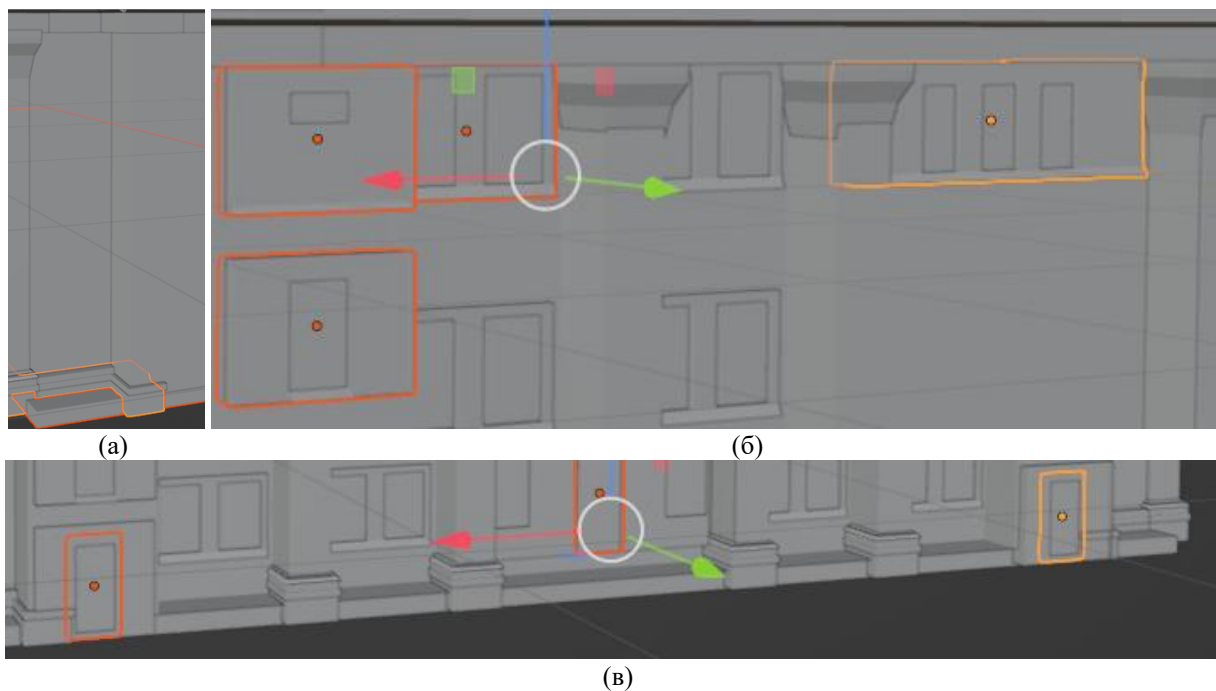


Рис. 11 – Перехід між стінами (а), чотири види вікон (б) та двері заднього входу (в)

Наявний широкий балкон по центру з тонькими дверима та огороженням (рис. 12 а). До центральних дверей ведуть сходи Т-образної форми з поручнями, які є найскладнішим елементом цієї частини будівлі

(рис. 12б, в). Під дахом є також вікна дуже специфічної форми з кам'яним огороженням та залізними прутами (рис. 12г).

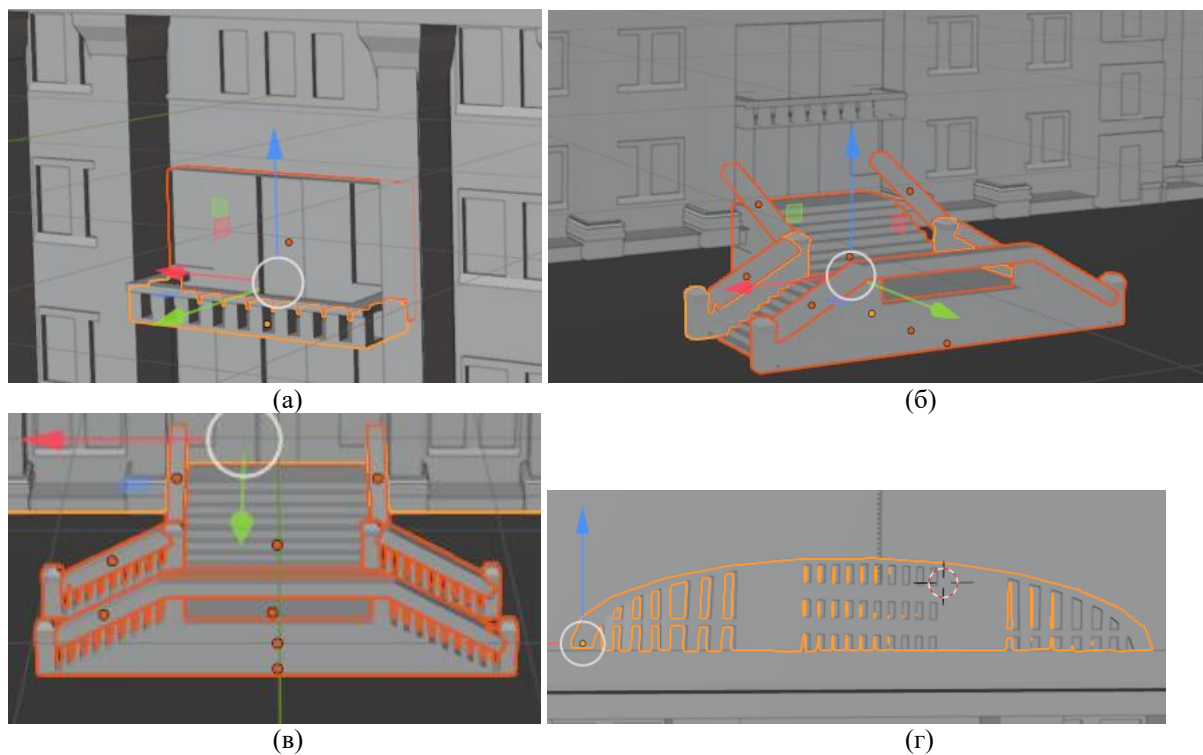


Рис. 12 – Балкон на другому поверсі (а), сходи – ракурсу під кутом (б) та під прямим кутом (в), віконця із залізними прутами (г)

Четвертим етапом було створення даху, яке почалося з основи, що проходить по всій довжині театру (рис. 13а). При створенні даху використовувалася симетрія в самому кінці, тому кожен елемент робили тільки для одного боку даху. Було створено відгалуження для бокової та верхньої частини даху (рис. 13б). Далі створили дах за огороженням, який подібний до основного, але менший за розмірами (рис. 13в).

Після цього побудували огороження на даху (рис. 14а) та балкон на даху, яких всього буде два (рис. 14б).

Наприкінці реалізували симетрію та завершили остаточний вигляд даху, завдяки циліндрам (рис. 15а, б).

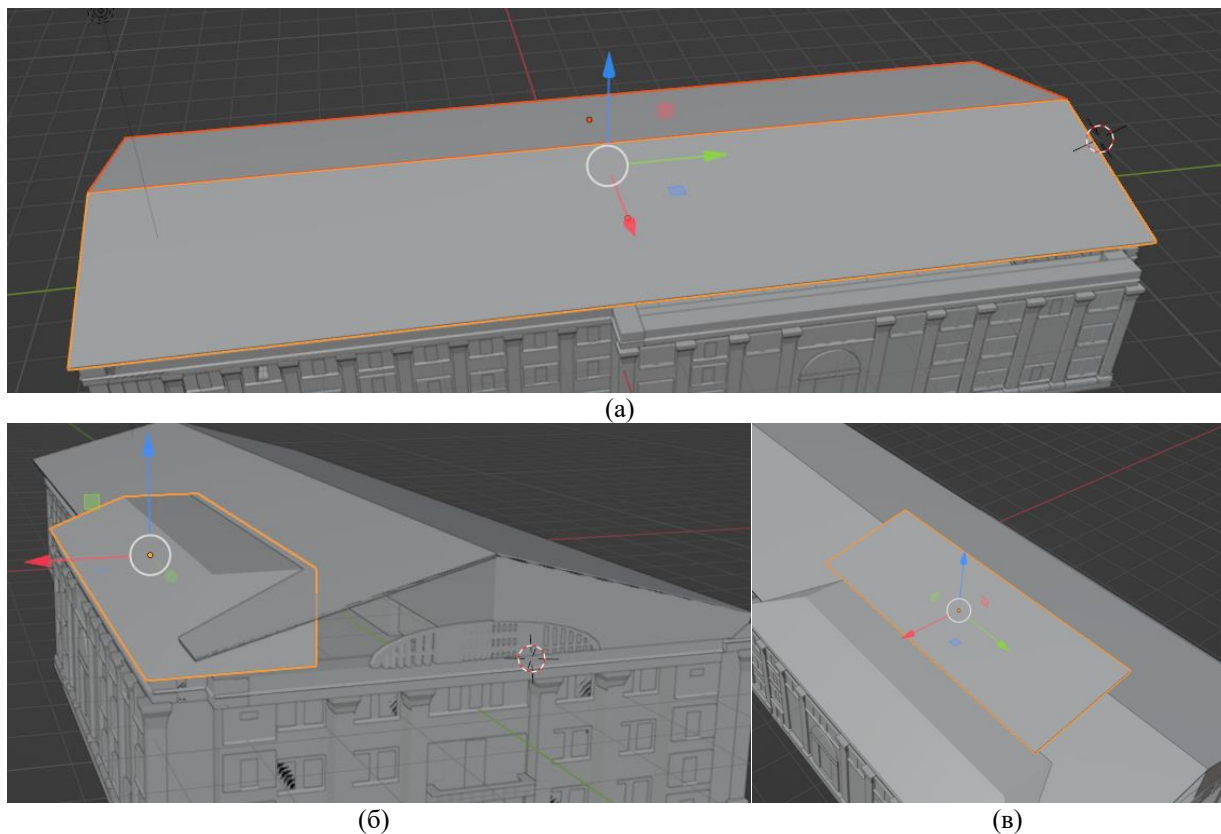


Рис. 13 – Основа даху (а), його відгалуження (б) та менший дах (в)

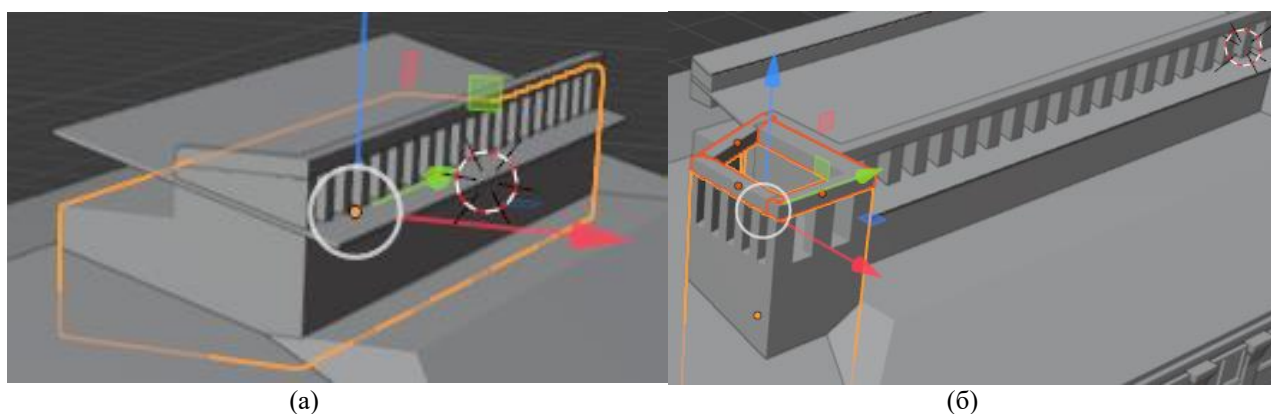
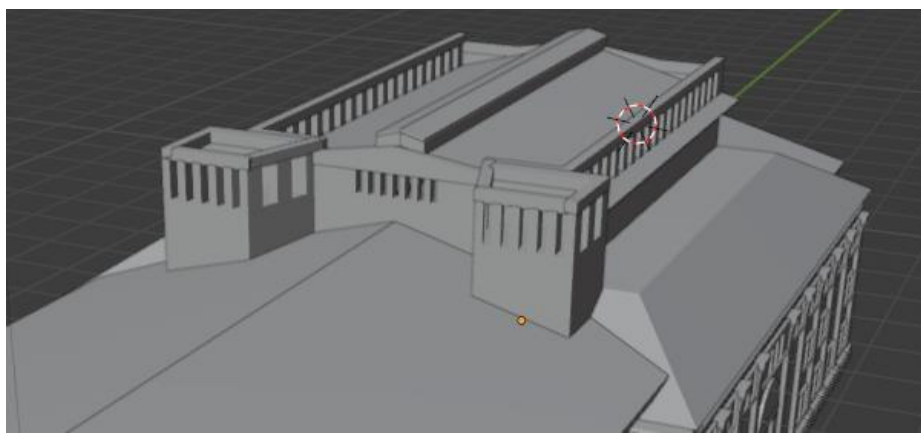
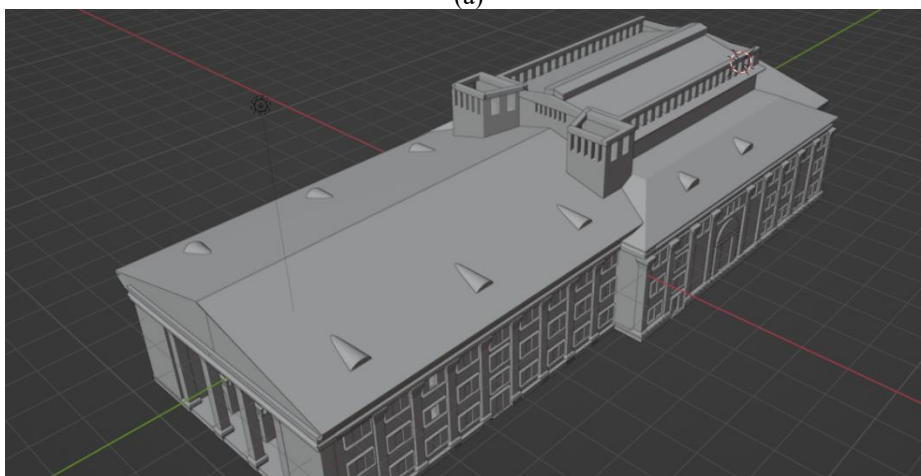


Рис. 14 – Огородження (а) та балкон (б) на даху



(a)

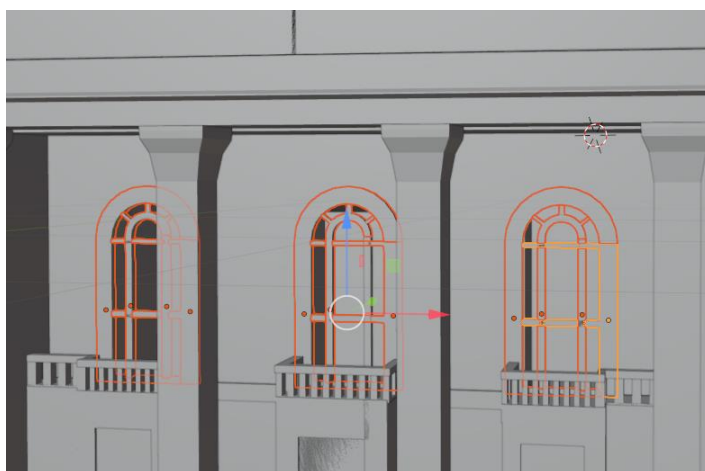


(б)

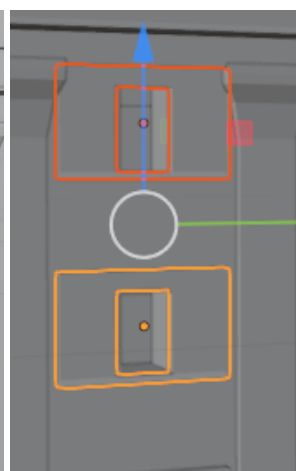
Рис. 15 – Створення центру даху (а) та завершений вигляд даху (б)

П'ятим етапом було моделювання декорацій та доопрацювання моделі. Роботу над цим етапом розпочали зі створення світла всередині будівлі, для цього було розміщено точкове джерело світла потужністю

1000W). Далі було створено вікна для проходження промінів світла на передній частині та збоку театру. Вікна мають арочну форму та багато елементів каркасу (рис. 16а, б).



(a)



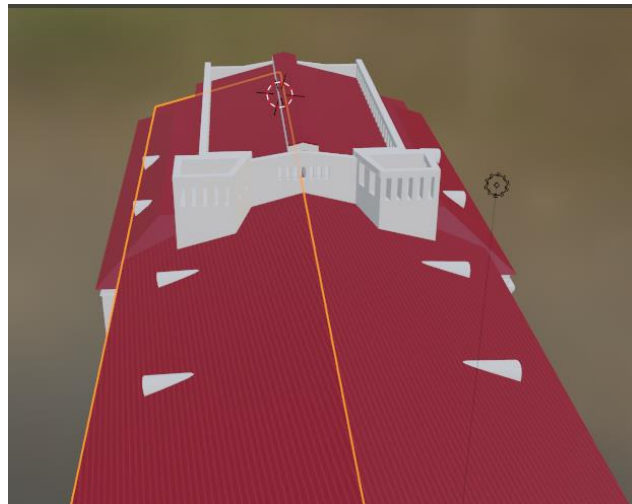
(б)

Рис. 16 – Вікна спереду (а) та збоку (б)

Наступний крок цього етапу – текстурування даху театру за допомогою нодів в меню шейдерів. Ноди – це базові блоки, які використовуються для створення або редагування текстур та матеріалів в тривимірному моделюванні. Був використаний метод вставки текстур у ноди та прив'язки до об'єктів через прості зв'язки блоків. Додавання текстур було розпочато з даху та його яскравою червоною текстурою. Також на самому даху є ще два маленьких дахи такого

самого кольору. Результат текстурування даху в меню «Шейдинг» наведено на рис. 17а.

Далі додали текстуру для фронтальної частини будівлі. Вона має три двері та три дерев'яних арочних вікна. Накладали текстуру дерева на усі перелічені елементи, що дозволило виділити їх на фоні іншої будівлі. Також додали текстуру для нижньої окантовки будівлі, яка має чорний колір з домішками сірого та димчастого відтінків (рис. 17б).



(а)

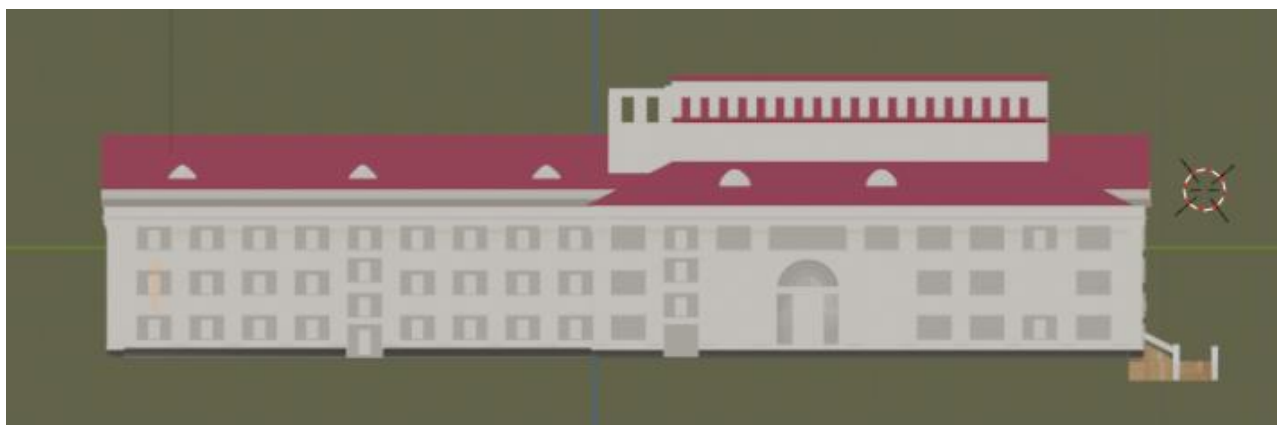


(б)

Рис. 17 – Результат текстурування даху (а) та передньої частини театру в меню «Шейдинг»

На бокових частинах було додано світло-сірі текстури на вікна та металеву текстуру на двері складу. Такі текстури зроблені з метою виділити ці елементи на фоні білої стіни театру. Багато елементів для додавання текстур, але всі вони є симетричними один до одного. Текстури було додано через вибір всіх вікон та останнього обраного вікна з текстурою – саме з нього можна застосовувати текстуру для всіх заздалегідь

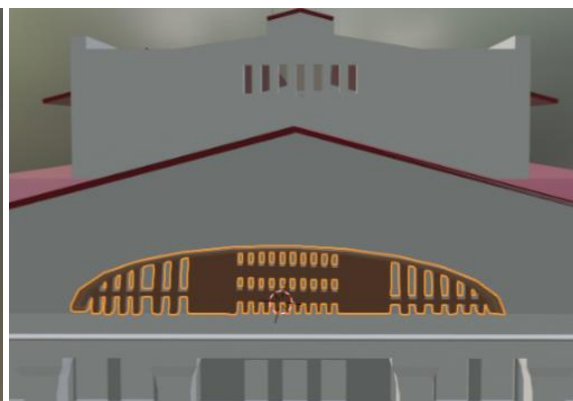
обраних елементів (рис. 18а). На задній частині розташована найбільша кількість різних елементів з різними текстурами (рис. 18б). Це й вікна та двері, які були в усіх формах на попередніх боках будівлі театру, сходи з пісочними відтінками, а також іржава решітка для вікон на горіщі театру, яка має арочну конструкцію та незвичайні форми (рис. 18в).



(a)



(б)



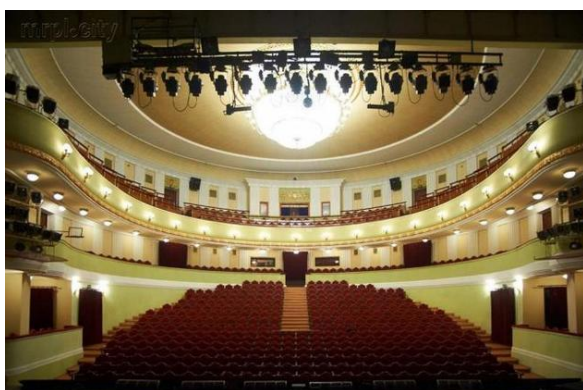
(в)

Рис. 18 – Результат текстурування бокової частини (а), задньої частини (б) та старої віконної рами (в) у меню «Шейдинг»

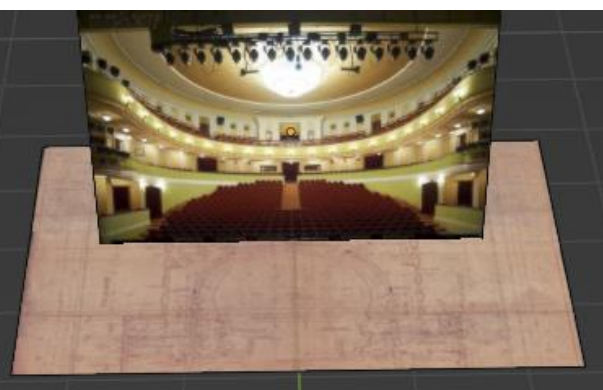
Текстурування надало роботі фінального вигляду, краси та впізнаваності. Пошук та накладання текстур є дуже складним та довгим етапом, в якому застосовуються функції нод. Текстурування дозволило виділити об'єкти на однотонному фоні та додати об'єму деталям.

Шостим етапом стало створення інтер'єру, а саме зали та сцени, які є головними елементами кожного театру.

В першу чергу, було зібрано матеріали для створення зали та сцени театру, а саме фотографій (рис. 19а) та креслень (рис. 3) приміщення зали театру, при цьому ракурси на фото дозволили точно відтворити дрібні деталі. Фотоматеріали було зіставлено у файлі Blender перпендикулярно зі збереженням симетрії на дальніх елементах інтер'єру для створення подальших об'єктів у залі театру (рис. 19б).



(a)



(б)

Рис. 19 – Фотографія театральної зали зі сцени (а) та зіставлені фото з кресленням у Blender

Далі створювали крісла у залі. Зала містить більше 400 крісел, тому моделювання всіх було розпочато з одного. Для цього крісло було зіставлено поміж двох фотоматеріалів. Розміри було визначено саме за дальніми кріслами, які стоять на балконі та йдуть дугою навколо нижніх рядів (рис. 20а, б).

Аналогічно створено решту крісел на балконах. Для дугового ряду доводилось змінювати кут повороту для кожного крісла. Моделювали тільки одну сторону, а іншу створювали через глобальну симетрію за віссю X (рис. 20 в, г).

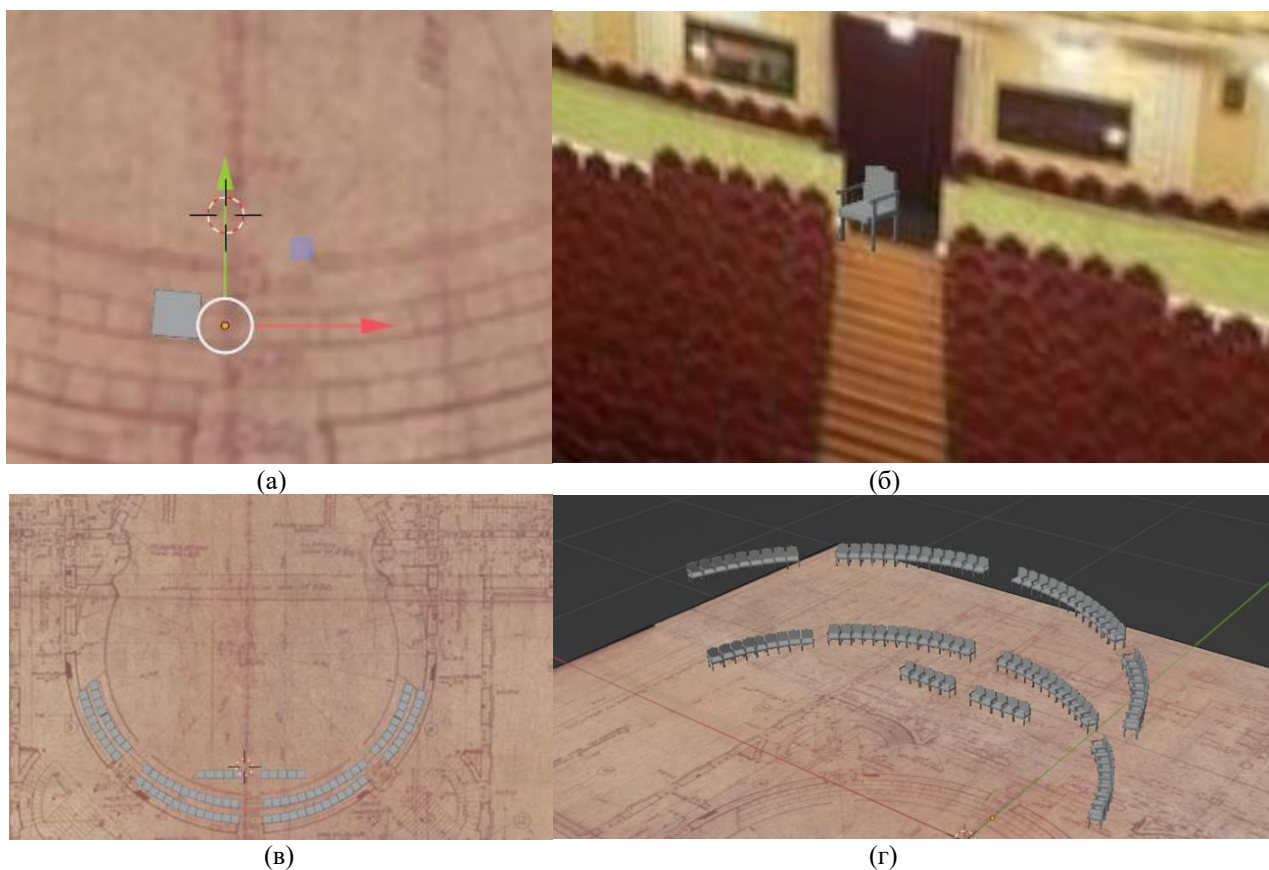


Рис. 20 – Ракурс крісла зверху на фоні креслення (а) та під кутом на фоні фотографії (б), ракурс рядів крісел зверху (в) та збоку на фоні креслення (г)

Далі було створено крісла, які йдуть рядами до самої сцени (їх в залі знаходиться близько 40 та ряди мають різну кількість крісел). Така форма рядів ідеально вписується у приміщення зали, яке має форму кола для забезпечення гарної акустики (рис. 21). Далі було створено сходи, які слугують підпорою для крісел в усьому залі та йдуть від верхнього ряду до нижнього, при цьому крісло стоїть на кожній другій сходинці (рис. 22).

Сьомим і останнім етапом було створено сцену та балконів, які були розташовані по кутах зі стін. Балкони є декоративними та мають вхід за кулісами. Кінцевий результат створеної моделі сцени та залу було перенесено до файлу з моделлю театру. На рис. 22 наведено сцену після рендерингу.

Побудована 3D-модель Донецького академічного обласного драматичного театру м. Маріуполя наведена на рис. 23.

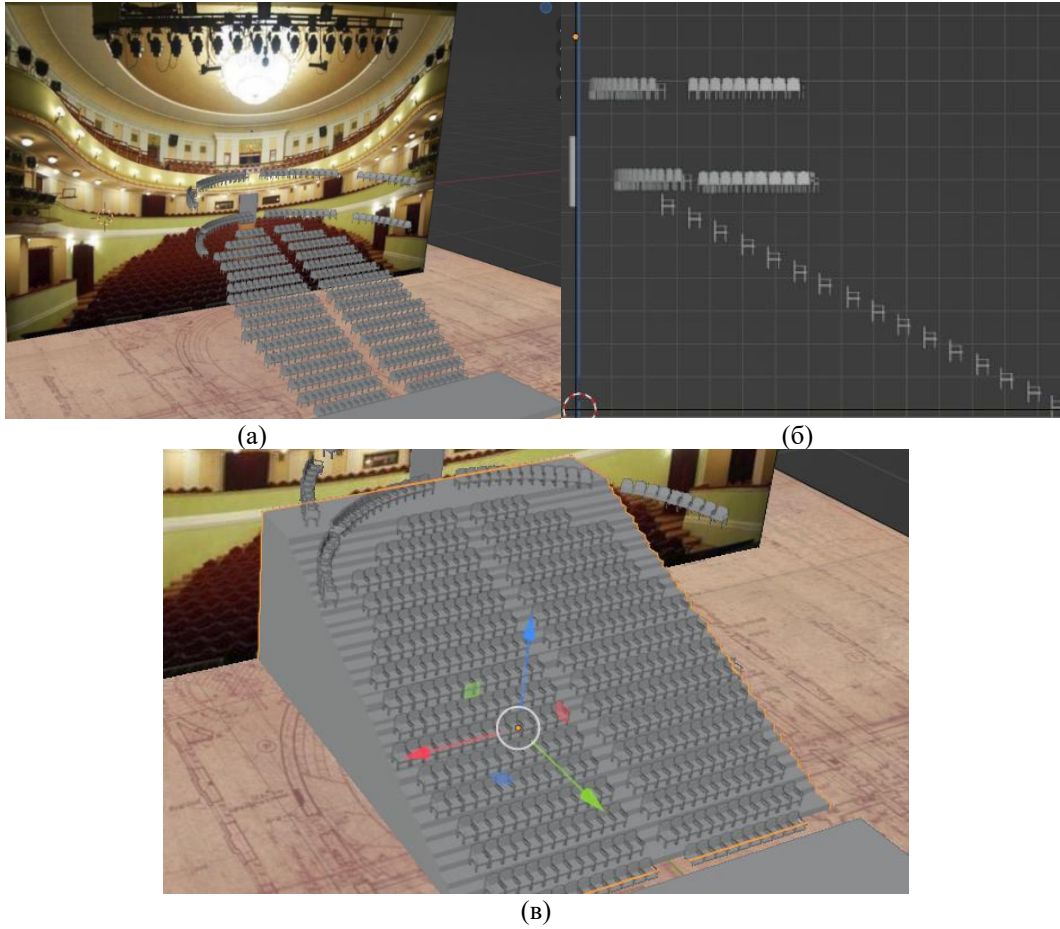


Рис. 21 – Вид на залу з кріслами під кутом (а), вид рядів крісел збоку (б), сходи (в)

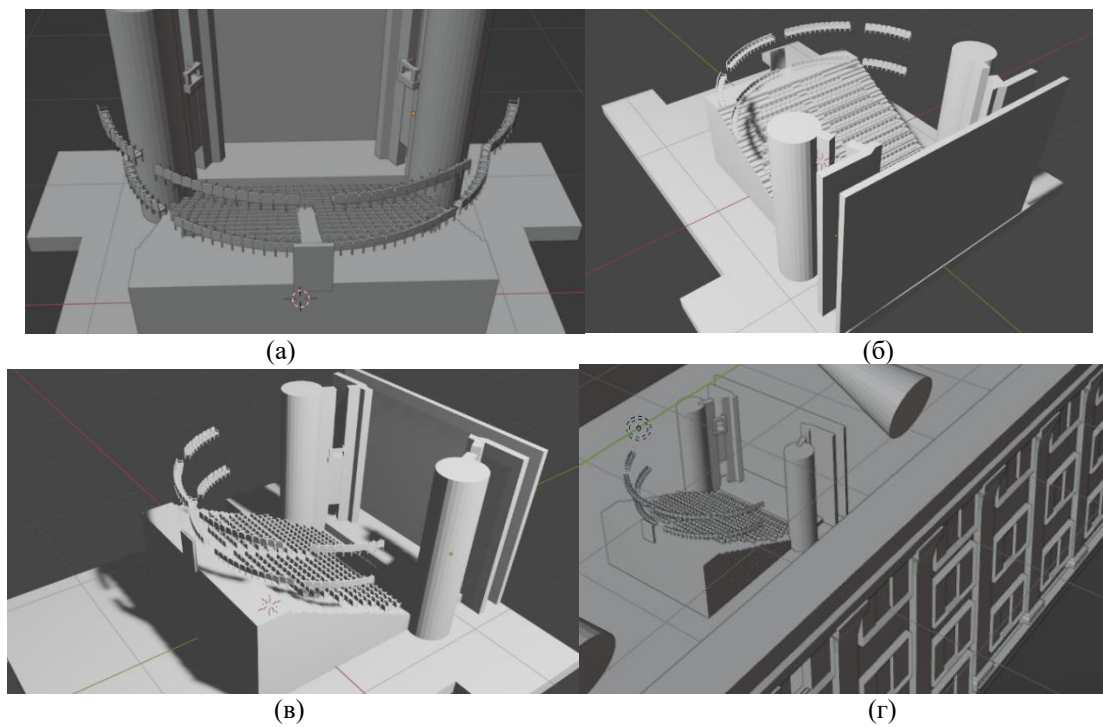


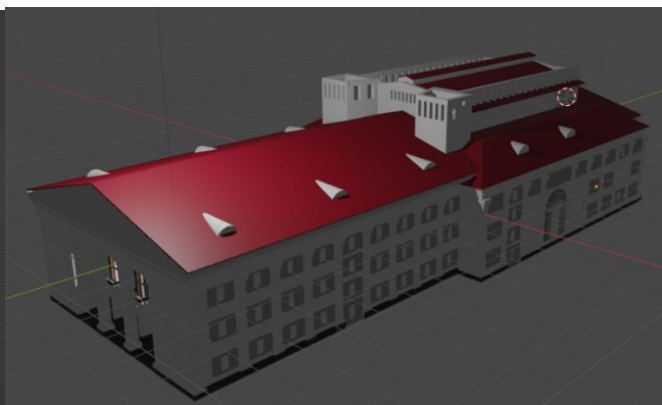
Рис. 22 – Вид на залу та сцену ззаду (а), з-за сцени (б), збоку (в), сцена в театрі (г)



(a)



(б)



(в)

Рис. 23 – Побудована 3D-модель Донецького академічного обласного драматичного театру м. Маріуполя: вид спереду (а), ззаду (б) та збоку (в)

Висновки

Таким чином, у даній роботі наведено детальний опис усіх етапів створення 3D-моделі Донецького академічного обласного драматичного театру у Маріуполі за допомогою програмного забезпечення Blender. Для моделювання використовувалися наявні фото- та відеоматеріали, а також креслення. Змодельовано фронтальну, бокові та задню частини будівлі з врахуванням специфічних елементів, таких як колони, вікна, двері та дах. Особлива увага приділялася створенню театральної зали та сцени, включаючи моделювання рядів крісел на основі креслень і фотографій. Для реалістичного відтворення матеріалів використовувалися

шейдери Blender (Principled BSDF, Glass, Emission) та вузли для накладання текстур.

Побудована модель Маріупольського драматичного театру може стати не лише цифровим архівом, а й інструментом для збереження пам'яті про втрачений історичний об'єкт і демонстрації масштабу трагедії, що сталася в Маріуполі. У подальшому цю модель можна відтворити у мініатюрі засобами 3D-друку для демонстрації в музеях, на виставках, тематичних заходах тощо. Використання 3D-моделей допомагає не лише зберегти пам'ять про втрачені об'єкти, а й сприяє їхньому потенційному відновленню в майбутньому.

Перелік використаних джерел

- [1] Заборона. Маріупольський драмтеатр: 60 років історії – від будівництва до авіаудару. URL: <https://zaborona.com/mariupolskyj-dramteatr-60-rokiv-istoriyi-vid-budivnyctva-do-aviaudaru> (дата звернення 15.11.2024).
- [2] Український інститут національної пам'яті. 2022 – бомбардування росіянами Маріупольського драмтеатру. URL: <https://uinp.gov.ua/istychyny-kalendar/berezen/16/2022-bombarduvannya-rosiyanamy-mariupolskogo-dramteatru> (дата звернення 25.11.2024).
- [3] Маріупольський Драмтеатр. Просторовий архів. URL: <https://theater.spatialtech.info/uk#models> (дата звернення 03.12.2024).
- [4] Тарновський А., Захарченко С., Тарновський М. Проблеми сучасних методів тривимірної фотограмметрії. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2024. Вип. 60(2). С. 31-41. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-60-2-31-41>.
- [5] «Mariupol Drama Theater – After russian Airstrike». URL: <https://sketchfab.com/3d-models/mariupol-drama-theater-after-russian-airstrike-b75f483ba0844bd498520d55a0051939> (дата звернення 01.12.2024).
- [6] «Mariupol Drama Theater». URL: <https://sketchfab.com/3d-models/mariupol-drama-theater-329f298b6014451ca54f8aa5c76523e0> (дата звернення 05.12.2024).
- [7] «Mariupol Drama Theater – Function zones». URL: <https://sketchfab.com/3d-models/mariupol-drama-theater-function-zones-e57201fcb27c4ad4a16c925653f447dd> (дата звернення 10.12.2024).
- [8] A City Within A Building: The Mariupol Drama Theatre. URL: <https://counterinvestigations.org/investigation/a-city-within-a-building-the-mariupol-drama-theatre> (дата звернення 11.12.2024).
- [9] Жмур Н. В., Землянікіна М. П. Історія становлення та сучасний стан технології пошуку інформації OSINT. *Наукові праці Київського авіаційного інституту. Серія: Юридичний вісник «Повітряне і космічне право»*. 2022. Вип. 3(64). С. 95-101. DOI: <https://doi.org/10.18372/2307-9061.64.16895>.
- [10] Заборона. Investigation. Theater-Shelter. Did Those Who Hid in the Mariupol Drama Theater Have a Chance to Survive? URL: <https://zaborona.com/inter-active/mariupol-theatre-investigation-en/> (дата звернення 12.12.2024).
- [11] Case Study: Modelling the Mariupol Drama Theatre Attack. URL: <https://citizenevidence.org/2023/02/23/3d-theatre-attack-mariupol> (дата звернення 15.12.2024).
- [12] Суспільне Донбас. Без лазерів, дронів та фотоапаратів – лише інформація від людей: як робили 3D-модель маріупольського драмтеатру. URL: <https://suspilne.media/donbas/415026-bez-lazeriv-droniv-ta-fotoaparativ-lise-informacia-vid-ludej-ak-robili-3d-model-mariupolskogo-dramteatru/> (дата звернення 01.12.2024).
- [13] Удосконалення технології створення тривимірних 3D-моделей з використанням креслень і фотографій механізмів старих зразків / Котлик С. В., Романюк О. Н., Соколова О. П., Шинкар О. В. *Automation technological and business processes*. 2024. № 1. С. 4-16. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i1.2765>.

CREATING A 3D MODEL OF THE MARIUPOL DRAMA THEATRE TO PRESERVE A HISTORICAL LANDMARK AND THE CULTURAL HERITAGE OF UKRAINE

Kryvenko O.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2860-6575>, e-mail: krivenko_o_v@pstu.edu;

Balalaieva O.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1461-4399>, e-mail: balalaeva_e_u@pstu.edu;

Kucherenko O.

bachelor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: kucherenko_o_m@students.pstu.edu

The paper is devoted to the creation of a 3D model of the Donetsk Academic Regional Drama Theater in Mariupol, destroyed as a result of hostilities. In connection with the threat of destruction of Ukrainian architectural monuments, the preservation of cultural heritage through digital modeling is of critical importance. An analysis of existing research and projects aimed at 3D documentation of the theater was conducted, in particular the work of the Center for Spatial Technologies (CST), Forensic Architecture, Skeiron, etc. It was determined that the main methods used in these projects were photogrammetry, 3D scanning using the example of identical theaters, and OSINT for the reconstruction of both the exterior and interior of the theater before and after the destruction. The main challenges in modeling the destroyed object were the limited and low quality of available historical data, which makes it difficult to reproduce small architectural details. The paper describes in detail the process of creating a 3D model using Blender software. The modeling used existing photo and video materials, as well as archival drawings. The work included a sequential reproduction of the

front, side and rear parts of the building, including columns, windows, doors and roof. Particular attention was paid to the modeling of the interior of the theater hall and stage, where more than 400 seats arranged in rows were reproduced according to drawings and photographs. To achieve realism, Blender shaders (Principled BSDF, Glass, Emission) and Shader Editor nodes were used to overlay textures on materials (brick, wood, metal, glass), which allowed adding volume and identifying elements on a monochromatic background. The created 3D model is an important tool for preserving historical memory and demonstrating the scale of the tragedy in Mariupol. The model can be used for future reconstruction of the building, virtual exhibitions or 3D printing of miniatures.

Keywords: 3D modeling, 3D model, Mariupol Drama Theater, architectural monument, Blender.

References

- [1] Zaborona. Mariupolskyi dramteatr: 60 rokiv istorii – vid budivnytstva do aviaudaru (Zaborona. Mariupol Drama Theater: 60 Years of History – From Construction to Airstrike). [Online]. Available: <https://zaborona.com/mariupolskyi-dramteatr-60-rokiv-istoriyi-vid-budivnyctva-do-aviaudaru>. Accessed on: November 15, 2024.
- [2] Ukrainskyi instytut natsionalnoi pam'iaty. 2022 – bombarduvannia rosiianamy Mariupolskoho dramteatru (Ukrainian Institute of National Remembrance. 2022 – Russian bombing of the Mariupol Drama Theater). [Online]. Available: <https://uinp.gov.ua/istorychnyy-kalendar/berezen/16/2022-bombarduvannya-rosiyanamy-mariupolskogo-dramteatru>. Accessed on: November 25, 2024.
- [3] Mariupolskyi Dramteatr. Prostorovyi arkhiv (Mariupol Drama Theater. Spatial Archive). [Online]. Available: <https://theater.spatialtech.info/uk#models>. Accessed on: December 03, 2024.
- [4] A. Tarnovskiy, S. Zakharchenko, and M. Tarnovskiy, "Problemy suchasnykh metodiv tryvymirnoi fotogrametrii" ["Problems of modern methods of three-dimensional photogrammetry"], *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia – Information technology and computer engineering*, vol. 60(2), pp. 31-41, 2024. doi: 10.31649/1999-9941-2024-60-2-31-41.
- [5] Mariupol Drama Theater – After russian Airstrike. [Online]. Available: <https://sketchfab.com/3d-models/mariupol-drama-theater-after-russian-airstrike-b75f483ba0844bd498520d55a0051939>. Accessed on: December 01, 2024.
- [6] Mariupol Drama Theater. [Online]. Available: <https://sketchfab.com/3d-models/mariupol-drama-theater-329f298b6014451ca54f8aa5c76523e0>. Accessed on: December 05, 2024.
- [7] Mariupol Drama Theater – Function zones. [Online]. Available: <https://sketchfab.com/3d-models/mariupol-drama-theater-function-zones-e57201fcb27c4ad4a16c925653f447dd>. Accessed on: December 10, 2024.
- [8] A City Within A Building: The Mariupol Drama Theatre. [Online]. Available: <https://counter-investigations.org/investigation/a-city-within-a-building-the-mariupol-drama-theatre>. Accessed on: December 11, 2024.
- [9] N. Zhmur, and M. Zemlianikina, "Istoriia stanovlennia ta suchasnyi stan tekhnologii poshuku informatsii OSINT" ["History of formation and current state of information retrieval technology OSINT"], *Naukovi pratsi Kyivskoho aviatsiinoho instytutu. Seriya: Yurydychnyi visnyk «Povitriane i kosmichne pravo» – Scientific Works of Kyiv Aviation Institute. Series Law Journal «Air and Space Law»*, vol. 3(64), pp. 95-101, 2022. doi: 10.18372/2307-9061.64.16895.
- [10] Zaborona. Investigation. Theater-Shelter. Did Those Who Hid in the Mariupol Drama Theater Have a Chance to Survive? [Online]. Available: <https://zaborona.com/interactive/mariupol-theatre-investigation-en/>. Accessed on: December 12, 2024.
- [11] Case Study: Modelling the Mariupol Drama Theatre Attack. [Online]. Available: <https://citizen-evidence.org/2023/02/23/3d-theatre-attack-mariupol>. Accessed on: December 15, 2024.
- [12] Suspilne Donbas. Bez lazeriv, droniv ta foto-aparativ – lyshe informatsiia vid liudei: yak robyly 3D-model mariupolskoho dramteatru (Public Donbas. Without lasers, drones and cameras – only information from people: how a 3D model of the Mariupol Drama Theater was made). [Online]. Available: <https://suspilne.media/donbas/415026-bez-lazeriv-droniv-ta-fotoaparativ-lise-informacia-vid-ludej-ak-robili-3d-model-mariupolskogo-dramteatru/>. Accessed on: December 01, 2024.
- [13] S.V. Kotlyk, O.N. Romaniuk, O.P. Sokolova, and O.V. Shynkar, "Udoskonalennia tekhnologii stvorennia tryvymirnykh 3D-modelei z vykorystanniam kreslen i fotohrafii mekhanizmiv starykh zrazkiv" ["Improving the technology of creating three-dimensional 3D models using drawings and photographs of old-style mechanisms"], *Automation technological and business processes*, № 1, pp. 4-16, 2024. doi: 10.15673/atbp.v16i1.2765.

Стаття надійшла 19.09.2025

Стаття прийнята 30.10.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Кривенко О.В., Балалаєва О.Ю., Кучеренко О.М. Створення 3D-моделі драматичного театру міста Маріуполя для збереження історичної пам'ятки та культурної спадщини України. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 7-24. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350944>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ
ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ УДАРСТІЙКИХ ПОВЕРХОНЬ

Сергієнко А.В.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1328-2572>, sergienko_a_v@pstu.edu;

Волобуєв Є.С.

магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, volobuiev_y_s@students.pstu.edu

У статті представлено дослідження застосування генетичних алгоритмів як інструменту автоматизованого проєктування ударостійких поверхонь. Актуальність роботи зумовлена потребою інженерних галузей у матеріалах і структурах, здатних витримувати інтенсивні механічні навантаження за умов обмежень щодо маси та вартості. У традиційних системах моделювання, що базуються на методі скінченних елементів або молекулярній динаміці, точність супроводжується високими обчислювальними витратами, що обмежує можливість швидкої оптимізації. У цій роботі показано, що еволюційні алгоритми можуть бути ефективним альтернативним або додатковим інструментом для дослідження великих просторових областей параметрів та знаходження оптимальних структур поверхонь. Для дослідження було розроблено комп'ютерний додаток на основі рушія Unity. У роботі використано два різні підходи: одноцільовий генетичний алгоритм (SGA), що орієнтований на максимізацію інтегрального коефіцієнта придатності, та багатоцільовий алгоритм недовідомованого генетичного сортування NSGA-II, здатний формувати фронт Парето для задач із суперечливими критеріями: мінімальною масою та мінімальною вартістю поверхні. Проведені симуляції включали моделювання зіткнення швидкісного об'єкта з поверхнями, виготовленими з різних матеріалів – сталі, алюмінію, вуглецевого волокна, пластику та дерева. Алгоритм SGA визначив найкращим матеріалом вуглецеве волокно, що забезпечило максимальний показник придатності завдяки поєднанню малої щільності та високої стійкості. Показано, що дерев'яні та пластикові поверхні, навіть за максимальної товщини, не здатні витримати удар, проте еволюційний алгоритм усе одно забезпечив відбір найкращих можливих рішень у межах обмежень. Алгоритм NSGA-II продемонстрував здатність формувати набір компромісних рішень та дозволив визначити альтернативні оптимальні варіанти залежно від пріоритетів – мінімальної вартості, мінімальної маси або збалансованої конфігурації. Порівняння обчислювальної ефективності показало, що швидкість NSGA-II значно падає при збільшенні кількості зразків, що є важливим фактором під час вибору алгоритму для практичного застосування. Результати роботи підтверджують, що генетичні алгоритми є потужним методом пошуку оптимальних конфігурацій ударостійких поверхонь у задачах фізичного моделювання. Отримані висновки можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем автоматичного проєктування, інтеграції багатоцільової оптимізації та розширення до складніших реалістичних моделей удару.

Ключові слова: автоматичне проєктування, еволюційний алгоритм, фізичне моделювання, штучний інтелект.

Постановка проблеми

Проєктування та оптимізація ударостійких поверхонь становлять важливу сферу досліджень у багатьох інженерних дисциплінах, включаючи авіакосмічну, автомобільну, оборонну, цивільну інфраструктуру та біомедичні застосування. Здатність поверхні витримувати та розсіювати ударну енергію без катастрофічного руйнування є ключовою умовою забезпечення безпеки, довговічності та продуктивності. Такі традиційні підходи до моделювання ударостійких поверхонь, як метод скінченних елементів, молекулярна динаміка та континуальна механіка пошкоджень, широко застосовуються для прогнозування механізмів деформації, розподілу напружень та поведінки руйнування за умов динамічного навантаження [1]. Хоча ці фізично обґрунтовані моделі забезпечують цінні теоретичні та практичні висновки, їх застосування часто обмежується значною обчислювальною складністю.

В останні роки штучний інтелект (ШІ) постає перспективною парадигмою для вдосконалення моделювання ударостійких поверхонь. Зокрема, алгоритми

машинного навчання дають змогу виявляти нелінійні взаємозв'язки та приховані закономірності у великих наборах даних, що охоплюють властивості матеріалів, структурні конфігурації та результати експериментів. На відміну від традиційних методів, моделі, керовані ШІ, здатні швидко прогнозувати реакцію поверхні на удар у широкому діапазоні умов, водночас зменшуючи потребу в обчислювально затратних симуляціях і повторних фізичних випробуваннях [2]. Крім того, методи ШІ сприяють багатокритеріальній оптимізації, забезпечуючи систематичне дослідження простору проєктних рішень для досягнення бажаних компромісів між міцністю, вагою, вартістю та технологічністю [3].

Актуальність обраної теми зумовлена зростаючою потребою у матеріалах і структурах, здатних витримувати екстремальні механічні навантаження, залишаючись при цьому легкими, економічно ефективними та сталими. Сфера застосувань охоплює ключові галузі, такі як аерокосмічна промисловість, оборона, транспорт, цивільне будівництво та засоби індивідуального захисту, де відмова матеріалів під час удару

може мати серйозні наслідки для безпеки, економіки та суспільства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

При аналізі методів автоматизації моделювання ударостійких поверхонь за допомогою еволюційних алгоритмів можна виділити два можливі підходи:

Перший підхід – використання багатоцільових еволюційних алгоритмів. Ці алгоритми є особливо ефективними тоді, коли потрібно максимізувати ударостійкість, одночасно мінімізуючи такі параметри, як вага, вартість чи товщина. Серед них NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) є одним із найпоширеніших методів, відомим своєю стабільністю та здатністю формувати фронти Парето для аналізу компромісів [4]. Більш сучасний варіант, NSGA-III, краще підходить для задач багатоцільової оптимізації з більш ніж трьома-чотирма критеріями [5, 6]. Інший варіант, MOEA/D (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition), розкладає багатокритеріальну задачу на підзадачі, що робить його особливо придатним для великих і складних просторів проектування [7, 8].

Коли ж кілька критеріїв зводяться до однієї зваженої функції – наприклад, зваженої суми ударостійкості, ваги та вартості – ефективно застосовуються традиційні еволюційні алгоритми. Генетичні алгоритми (GA) є стандартним вибором для оптимізації шаруватих матеріалів, оскільки вони можуть працювати як з дискретними змінними (тип матеріалу), так і з неперервними (товщина). Диференціальна еволюція (DE), навпаки, є більш ефективною для неперервних змінних і добре підходить для оптимізації товщини шарів у широких діапазонах. Еволюційні стратегії, зокрема CMA-ES, також показують високу ефективність у неперервних просторах проектування, особливо коли кількість шарів є фіксованою, а основним параметром для оптимізації виступає розподіл товщини.

В цій роботі було використано два генетичних алгоритми: SGA та NSGA-II.

Одноцільовий генетичний алгоритм (SGA) – це метод оптимізації, натхненний процесом природного відбору та генетики, розроблений для пошуку оптимального або майже оптимального рішення задачі, визначеної однією цільовою функцією. SGA працює шляхом підтримки популяції кандидатів на рішення, кожне з яких представлено як хромосома, що кодує можливі значення змінних рішення. Шляхом ітеративного застосування операторів відбору, кросовера та мутації алгоритм еволюціонує популяцію до кращих рішень відносно цільової функції.

Процес починається з ініціалізації популяції, яка зазвичай генерується випадковим чином у межах можливого простору пошуку. Кожна особина в цій популяції оцінюється за допомогою цільової функції, яка кількісно визначає її придатність або якість як рішення проблеми. Потім механізм відбору ймовірно надає перевагу особинам з вищими значеннями придатності,

дозволяючи їм дати більше потомства наступному поколінню. Поширені методи відбору включають відбір за допомогою рулетки, турнірний відбір та відбір на основі рангів, кожен з яких по-різному балансує дослідження та експлуатацію.

Кросовер, або рекомбінація, застосовується до пар вибраних особин для отримання потомства, яке поєднує ознаки обох батьків. Цей оператор призначений для використання існуючих хороших рішень шляхом змішування їхнього генетичного матеріалу, створюючи таким чином нові рішення-кандидати, які можуть успадкувати корисні характеристики. Мутація, з іншого боку, вносить випадкові зміни в окремі хромосоми з низькою ймовірністю, забезпечуючи генетичну різноманітність і допомагаючи алгоритму уникнути локального оптимуму. Обидва оператори мають вирішальне значення для підтримки балансу між інтенсифікацією (пошук навколо перспективних областей) та диверсифікацією (дослідження нових областей простору пошуку).

Після генерації потомства вони формують нову популяцію для наступного покоління, і процес повторюється, доки не буде задоволено критерій завершення. Звичайні умови завершення включають досягнення заздалегідь визначеної кількості поколінь, досягнення задовільного об'єктивного значення або спостереження застою в покращенні популяції з часом. Кінцевий результат SGA зазвичай є найкращим рішенням, яке зустрічається під час еволюційного процесу.

Алгоритм генетичного сортування за недовомінованістю II (NSGA-II) є одним із найбільш поширених багатокритеріальних еволюційних алгоритмів. Він став одним із найвпливовіших підходів для розв'язання задач оптимізації, у яких необхідно враховувати кілька суперечливих критеріїв одночасно. Алгоритм особливо придатний для інженерних задач проектування, таких як оптимізація ударостійких поверхонь, де природно виникають компроміси між такими характеристиками, як поглинання енергії, вага та вартість.

Багатокритеріальні задачі оптимізації не мають єдиного оптимального розв'язку, натомість формують множину так званих Парето-оптимальних рішень. Розв'язок вважається Парето-оптимальним, якщо не існує іншого рішення, яке покращує один критерій без погіршення іншого. NSGA-II ефективно наближує цю фронту Парето, еволюціонуючи популяцію кандидатів рішень упродовж багатьох поколінь [9].

Ключові особливості NSGA-II:

- Сортування за недовомінованістю. Алгоритм розподіляє популяцію на різні фронти на основі відношення домінування. Перший фронт складається з недовомінованих рішень, другий – з тих, які домінуються лише рішеннями з першого фронту, і так далі. Це сортування гарантує, що рішення з кращим рангом мають вищий пріоритет під час відбору [10].

- Призначення відстані скупченості. Щоб зберегти різноманітність уздовж фронти Парето, NSGA-II вводить поняття відстані скупченості. Це міра

близькості рішення до його сусідів у просторі цілей. Рішення у менш скупчених регіонах мають перевагу, що сприяє рівномірному розподілу рішень уздовж фронти.

- Швидкий елітарний відбір. NSGA-II використовує елітарний підхід, поєднуючи батьківську та дочірню популяції перед відбором. Із цього об'єднаного набору індивіди сортується за рангом непомітності та відстанню скупченості, що гарантує збереження високоякісних рішень у процесі еволюції [11, 12].

Послідовність роботи NSGA-II відповідає типовому еволюційному алгоритму з певними вдосконаленнями для багатокритеріальної оптимізації:

- Ініціалізація. Генерується початкова популяція рішень, зазвичай випадковим чином. Кожен індивід кодує можливу конфігурацію змінних проєктування (наприклад, товщину шарів та вибір матеріалів).

- Оцінювання. Кожен кандидат оцінюється відповідно до визначених цілей. Для ударостійких поверхонь це можуть бути результати симуляцій для поглинання енергії, ваги та вартості.

- Відбір. Індивіди відбираються для відтворення на основі їхнього рангу непомітності та відстані скупченості, з перевагою для тих, які ближчі до фронти Парето й розташовані в менш насичених областях.

- Варіація. До вибраних рішень застосовуються генетичні оператори, такі як кросовер і мутація, для створення нащадків.

- Комбінація та сортування. Батьківська й дочірня популяції об'єднуються в єдиний пул. Застосовуються сортування за непомітністю та обчислення відстані скупченості для формування нового покоління [13].

- Ітерація. Процес повторюється доти, доки не буде досягнуто критерію зупинки, зазвичай максимальної кількості поколінь або збіжності фронту Парето.

Мета статті

Метою статті є аналіз та вдосконалення сучасних алгоритмів моделювання ударостійких поверхонь з використанням еволюційних алгоритмів. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань. Зокрема, необхідно здійснити аналіз існуючих методів та алгоритмів моделювання ударостійких поверхонь, дослідити теоретичні основи еволюційних алгоритмів, розробити алгоритм моделювання ударостійких поверхонь з використанням еволюційних алгоритмів, провести експериментальну перевірку алгоритму на результатах фізичних симуляцій, а також оцінити ефективність запропонованого підходу та порівняти його з існуючими методами.

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – процес моделювання ударостійких поверхонь.

Предметом дослідження є алгоритми моделювання ударостійких поверхонь за допомогою еволюційних алгоритмів.

Виклад основного матеріалу

Для реалізації експерименту, за допомогою кросплатформового ігрового рушія Unity, було розроблено додаток, який включає наступні компоненти:

1. Головне меню (рис. 1) – дозволяє зайти в меню налаштувань та запустити обидва еволюційні алгоритми;

2. Графічний інтерфейс користувача (рис. 2) – забезпечує відображення інформації про кожний зразок симуляції, дозволяє керувати швидкістю візуалізації симуляції, дозволяє обрати яке з поколінь симуляцій візуалізувати, інформує про прогрес симуляції, дає користувачу поради щодо кнопок, якими можна контролювати візуалізацію симуляцій;



Рис. 1 – Головне меню

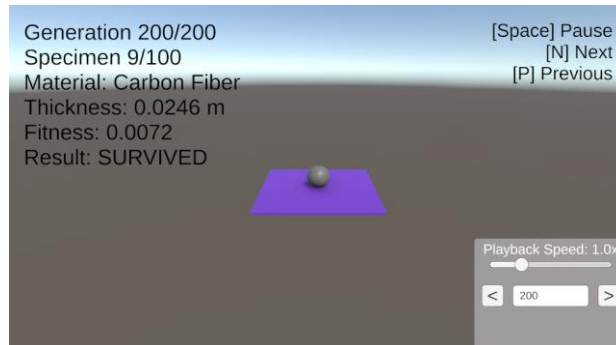


Рис. 2 – Графічний інтерфейс користувача

3. Візуалізатор симуляцій – дозволяє користувачам побачити абстрактну репрезентацію процесу зіткнення швидкісного об'єкту та ударостійкої поверхні для кожної окремої симуляції кожного покоління;

4. Менеджер еволюції – виконує розрахунки необхідні для симуляції кожного зіткнення та самого процесу еволюції, визначає характеристики матеріалів ударостійких поверхонь, зберігає інформацію про кожне покоління етап еволюції для подальшої візуалізації за допомогою візуалізатора симуляцій.

Робота симулятором виконується поетапно:

- 1) запустити додаток;
- 2) обрати бажаний алгоритм;
- 3) почекати поки симуляція завершиться;

4) переглянути результати симуляції у візуалізаторі або графіку;

5) за допомогою клавіш «N» та «P» обрати симуляцію для відображення або запустити автоматичний перегляд усіх симуляцій покоління по черзі за допомогою клавіші «Space»;

6. У графічному інтерфейсі користувача, у контрольній панелі справа знизу, обрати бажану швидкість візуалізації;

7. У контрольній панелі обрати бажане покоління для аналізу процесу еволюції. Це можна зробити, написавши номер покоління у полі вводу або натискаючи на стрілки для переходу на наступне або попереднє покоління;

8. Для завершення роботи потрібно закрити вікно програми.

Використовувались наступне технічне забезпечення:

- обчислювальні засоби – комп'ютер з операційною системою Windows 10 або Windows 11, з процесором 64-бітної архітектури та підтримкою інструкцій SSE2, графічний процесор, що підтримує графічний API DX11 та 8 ГБ оперативної пам'яті;

- засоби введення інформації – клавіатура та миша;

- засоби відображення інформації – монітор.

Для проведення експериментів було підготовлено 5 матеріалів для генерації ударостійких поверхонь (табл. 1). Усі зазначені характеристики вимірюються у абстрактних відносних одиницях, які можуть давати очікувані результати лише в контексті даного комп'ютерного додатку, розробленого з використанням рушія Unity

Таблиця 1
Характеристики використаних матеріалів

	Щільність	Стійкість	Ціна за одиницю ваги
Алюміній	2700	5	2
Вуглецеве волокно	1600	10	6
Пластик	950	2	1
Сталь	7850	8	3.5
Дерево	600	1	0.5

Додаткові характеристики симуляції: маса швидкісного об'єкту – 50, гравітація – 9,81, висота падіння – 5, кількість поколінь еволюції – 200, кількість зразків у кожному поколінні – 100, мінімальна товщина поверхні – 0.001, максимальна товщина поверхні – 0,1 м.

Коефіцієнт придатності зразка, що вистояв зіткнення, розраховується за формулою 1:

$$fitness = \frac{1}{1+weight*0.5+cost*0.5} \quad (1)$$

де fitness – коефіцієнт придатності;

weight – вага поверхні;

cost – вартість поверхні.

Коефіцієнт придатності зразка, що не вистояв зіткнення зі швидкісним об'єктом та зламався, розраховується за формулою 2:

$$fitness = \frac{0.05 * (\frac{resistance}{impactStrength})}{1+weight+cost} \quad (2)$$

де fitness – коефіцієнт придатності;

weight – вага поверхні;

cost – вартість поверхні;

resistance – стійкість поверхні до зіткнень;

impactStrength – сила зіткнення.

В результаті еволюції було отримано зразок (рис. 3) з найкращою придатністю з наступними характеристиками:

- матеріал: вуглецеве волокно;
- товщина поверхні: 0,0245 м;
- придатність: 0,0072.

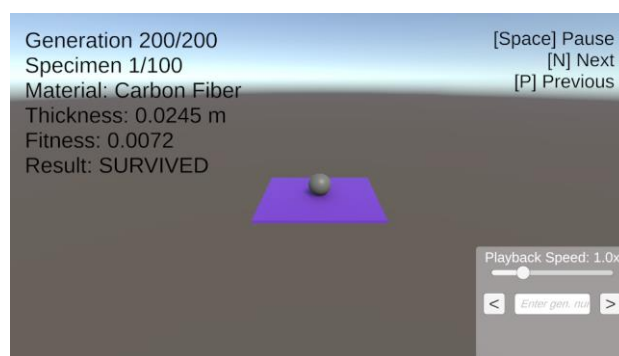


Рис. 3 – Вуглецеве волокно, найпридатніший зразок

Результат цієї симуляції показує, що незважаючи на високу вартість, вуглецеве волокно вигідно використовувати тому, що його висока стійкість зменшує необхідну товщину поверхні, що, у свою чергу, зменшує масу поверхні. Менша маса означає, що треба закупити менше матеріалу, тому витрачається менше грошей.

Другий по придатності матеріал це алюміній. Найпридатніший зразок (рис. 4), що використовує алюміній має товщину поверхні: 0,0491 м та придатність 0,0050.

Вартість алюмінію нижча за вартість вуглецевого волокна у 3 рази, але й стійкість нижча у 2 рази. Вуглецеве волокно також перевершує алюміній в щільності. Це приводить до того, що на кожну одиницю товщини поверхні приходить більше маси матеріалу. Показник придатності відображає цю негативну залежність у вигляді меншої цифри ніж у поверхні з вуглецевого волокна.

Третій по придатності матеріал поверхні це сталь. Найпридатніший зразок зі сталі (рис. 5) має товщину поверхні 0,0307 м та придатність: 0,0018.

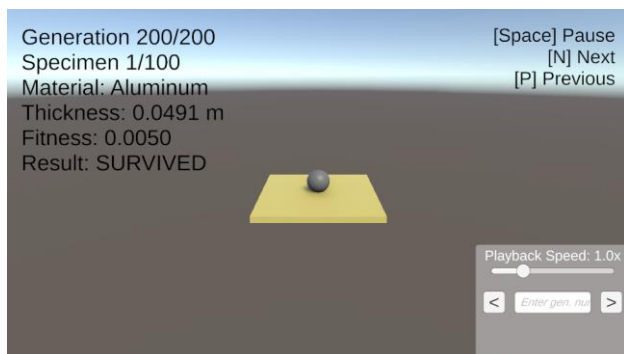


Рис. 4 – Алюміній, найпридатніший зразок

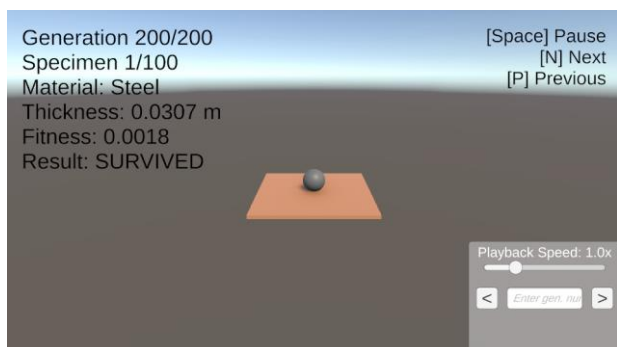


Рис. 5 – Сталь, найпридатніший зразок

Ціна сталі вище за ціну алюмінію, але це не головна причина різкого зменшення максимальної придатності. Щільність сталі більше за щільність алюмінію майже у 3 рази, що значно перевершує збільшення стійкості, яка є більшою всього в 1,6 рази. Більша стійкість дає змогу робити поверхні з меншою товщиною, але значно підвищена щільність скасовує цю перевагу, роблячи вагу та ціну поверхні вище. Функція придатності описала ці компроміси, обчисливши значно меншу цифру.

Четвертий по придатності матеріал поверхні це дерево. Важливо зазначити, що при наявних лімітах товщини (максимальна товщина – 0,1), усі поверхні з дерева та пластику провалюють симуляцію, ламаючись при зіткненні, але еволюційний алгоритм все ще намагається максимізувати значення придатності. Найпридатніший зразок з дерева (рис. 6) має товщину поверхні 0,1000 м та придатність: 0,000224.

Дерево має найменші показники ціни та щільності, але це також стосується показника стійкості. Розрахована мінімальна стійкість для успішного витримування зіткнення при максимальній товщині поверхні – 2,4535. Формула придатності для невдалих поверхонь нагороджує за те, наскільки близькою була поверхня до успішного витримування зіткнення, тому зразки з мінімальною товщиною (для мінімізації ціни) були породжені у ході еволюції.

Останній по придатності матеріал поверхні це пластик. Найпридатніший зразок з пластику (рис. 7)

має товщину поверхні 0,1000 м та придатність: 0,000213.

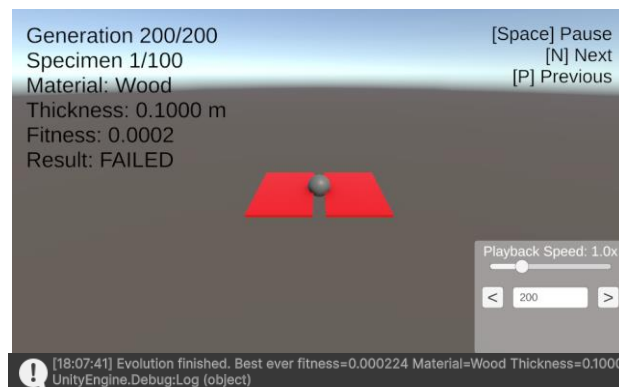


Рис. 6 – Дерево, найпридатніший зразок

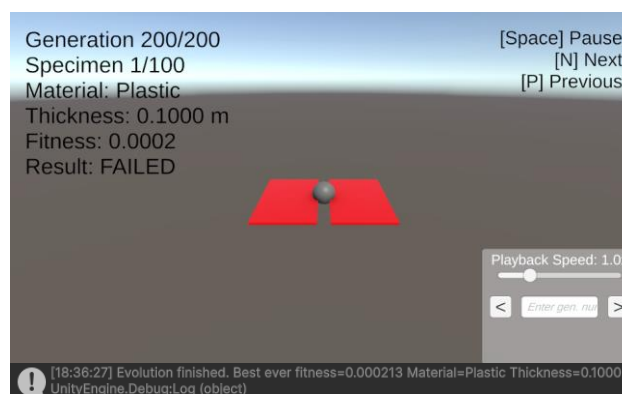


Рис. 7 – Пластик, найпридатніший зразок

Маючи більші за дерево ціну та щільність, пластик має трохи нижчу придатність. Нагороди за близькість до успішного витримування зіткнення було недостатньо для перевершення дерева за значенням придатності.

Підсумки проведених експериментів демонструють здатність генетичних алгоритмів знаходити оптимальні комбінації матеріалів та товщини ударостійкої поверхні з оглядом на декілька критеріїв оцінки одночасно. В даних експериментах було використано спрощену абстрактну фізичну модель, але універсальність генетичних алгоритмів дає змогу використовувати цей підхід у більш складних симуляціях. Слід зазначити, що одноцільовий алгоритм штовхає еволюцію к одному єдиному «найкращому» рішення, яке базується на вагах, призначених кожному критерію оцінки у функції придатності. У реальних випадках частіше не існує «універсального найкращого рішення», тож приходится шукати множину оптимальних рішень, фронт Парето, який можна аналізувати та знаходити потрібні компроміси. Наявний елітарний одноцільовий генетичний алгоритм не може цього робити. Для цієї задачі потрібно адаптувати концепцію вирішення проблеми моделювання ударостійких поверхонь за допомогою

еволюційних алгоритмів під використання багатоцільових алгоритмів, таких як NSGA-II, NSGA-III та MOEA/D.

При використанні алгоритму NSGA-II генерується множина результатів (фронт Парето), аналізуючи які можна обрати бажане компромісне рішення.

Результат роботи NSGA-II можна побачити на рисунку 8.

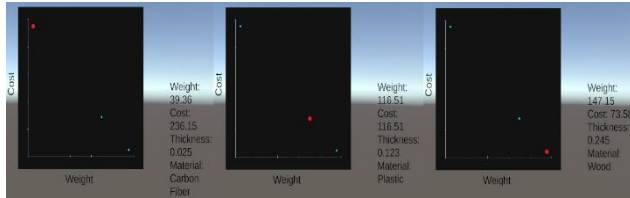


Рис. 8 – Результат роботи NSGA-II

Було знайдено три рішення: два для граничних значень ціни та ваги та одне для однакових значень. У цьому випадку, залежно від потреб, можна обирати рішення: чи потрібна дешева поверхня, чи потрібна легка поверхня, або щось середнє.

Важливо зазначити, що алгоритм NSGA-II значно повільніший за SGA при великій кількості зразків. Порівняння швидкості роботи обох алгоритмів можна побачити у таблиці 2.

Таблиця 2
Порівняння швидкості алгоритмів SGA та NSGA-II

	SGA	NSGA-II
50 зразків	1,46 сек	1,47 сек
100 зразків	1,46 сек	3,05 сек
150 зразків	1,46 сек	4,93 сек
200 зразків	1,46 сек	7,25 сек
300 зразків	1,46 сек	12,06 сек
500 зразків	1,47 сек	25,68 сек

Як можна побачити, кількість зразків майже не впливає на швидкість роботи алгоритму SGA, тоді як швидкість роботи NSGA-II прогресивно падає зі збільшенням кількості зразків. При числі зразків 500, NSGA-II потребує приблизно в 17 разів більше часу ніж SGA, це дуже важливе врахування при виборі між двома алгоритмами.

Підсумовуючи різницю між одноцільовим алгоритмом SGA та багатоцільовим алгоритмом NSGA-II, можна сказати, що SGA краще використовувати коли потрібно знайти лише одне компромісне рішення, описане функцією придатності. Це підходить для задач, де не існує потреби в порівнянні багатьох рішень та бажані характеристики добре відомі. Якщо ж задача потребує більшої гнучкості у виборі – алгоритм NSGA-II може забезпечити користувача множиною можливих рішень, серед яких користувач може обирати потрібне компромісне рішення залежно від поставленої задачі та обмежень по ресурсам.

Алгоритм NSGA-II не слід використовувати при великій кількості зразків, коли швидкість роботи алгоритму є важливим міркуванням.

Висновки

В результаті дослідження було встановлено, що еволюційні алгоритми здатні вирішувати широкий спектр задач, пов'язаних з фізичною симуляцією, одна з яких це автоматичне моделювання ударостійких поверхонь та оптимізація їх ціни та ваги шляхом пошуку оптимальних комбінацій матеріалів та товщини.

В ході роботи було розроблено комп'ютерну програму, яка симулює процес еволюції та абстрактну фізичну модель зіткнення поверхні з швидкісним об'єктом, графічно представляє результати еволюційного процесу.

Також було порівняно два типи еволюційних алгоритмів (одноцільовий та багатоцільовий) на прикладі алгоритмів SGA та NSGA-II. При порівнянні було виявлено важливе обмеження швидкості роботи алгоритму NSGA-II при великій кількості зразків.

Перелік використаних джерел

- [1] Bheel N., Mohammed B. S., Woen E. L. Modelling and optimizing the impact resistance of engineered cementitious composites with Multiwalled carbon nanotubes using response surface methodology. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1. Article 24107. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75641-5>.
- [2] Ben-Zion Y., Einhorn Zarzecki R., Glazer J., Finkelstein N. D. Leveraging AI for Rapid Generation of Physics Simulations in Education: Building Your Own Virtual Lab. *The Physics Teacher*. 2025. Vol. 63, no. 6. Pp. 424-427. DOI: <https://doi.org/10.1119/5.0252343>.
- [3] Slowik A., Kwasnicka H. Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems. *Neural Computing and Applications*. 2020. Vol. 32, no. 16. Pp. 12363-12379. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04832-8>.
- [4] Zhao Z., Liu B., Zhang C., Liu H. An improved adaptive NSGA-II with multi-population algorithm. *Applied Intelligence*. 2018. Vol. 49, no. 2. Pp. 569-580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1263-6>.
- [5] Pérowski A., Ben-Hamida S. Multi-objective Optimization. *Evolutionary Algorithms*. Hoboken, NJ, USA, 2017. Pp. 165-182. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119136378.ch5>.
- [6] Yuan Y., Xu H., Wang B. An improved NSGA-III procedure for evolutionary many-objective optimization. *Genetic and Evolutionary Computation Conference: Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Vancouver, Canada, 12-16 July 2014*. New York, USA, 2014. Pp. 661-668. DOI: <https://doi.org/10.1145/2576768.2598342>.

- [7] Whitney W., Rana S., Dzubera J., Mathias K. E. Evaluating evolutionary algorithms. *Artificial Intelligence*. 1996. Vol. 84, no. 1-2. Pp. 357-358. DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(96\)81371-3](https://doi.org/10.1016/0004-3702(96)81371-3).
- [8] Scardua L. A. Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *Applied Evolutionary Algorithms for Engineers Using Python*. 2021. Pp. 149-158. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429298028-12>.
- [9] Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6, no. 2. Pp. 182-197. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- [10] Deb K., Jain H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014. Vol. 18, no. 4. Pp. 577-601. DOI: <https://doi.org/10.1109/tevc.2013.2281535>.
- [11] Keller A. A. Metaheuristic Optimization Algorithms. *Multi-Objective Optimization In Theory and Practice II: Metaheuristic Algorithms*. 2019. P. 54-83. DOI: <https://doi.org/10.2174/9781681087054119010004>.
- [12] Domínguez J., Montiel O., Sepúlveda R., Medina N. High Performance Architecture for NSGA-II. *Recent Advances on Hybrid Intelligent Systems*. Berlin, Heidelberg, 2013. Pp. 451-461. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33021-6_35.
- [13] Scardua L. A. Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm II. *Applied Evolutionary Algorithms for Engineers Using Python*. 2021. Pp. 137-148. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429298028-11>.

RESEARCH INTO THE USE OF GENETIC ALGORITHMS FOR AUTOMATED DESIGN OF IMPACT-RESISTANT SURFACES

Sergienko A.V.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, https://orcid.org/0000-0003-1328-2572 , e-mail: sergienko_a_v@pstu.edu ; ORCID:
Volobuev Y.S.	master's student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: volobuev_y_s@students.pstu.edu

The article presents a study on the use of genetic algorithms as a tool for automated design of impact-resistant surfaces. The relevance of the work is driven by the need in engineering fields for materials and structures capable of withstanding intense mechanical loads under constraints on mass and cost. In traditional modelling systems based on the finite element method or molecular dynamics, accuracy is accompanied by high computational costs, which limits the possibilities for rapid optimization. This study demonstrates that evolutionary algorithms can serve as an effective alternative or complementary tool for exploring large parameter spaces and finding optimal surface structures. For the research, a computer application was developed using the Unity engine. Two different approaches were employed: a single-objective genetic algorithm (SGA), aimed at maximizing the integral fitness coefficient, and the multi-objective Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), capable of forming a Pareto front for problems with conflicting criteria: minimal mass and minimal surface cost. The simulations included modelling collisions of a high-velocity object with surfaces made from various materials – steel, aluminum, carbon fiber, plastic, and wood. The SGA algorithm identified carbon fiber as the best material, providing the highest fitness score due to its combination of low density and high resistance. It was shown that wooden and plastic surfaces, even at maximum thickness, cannot withstand the impact; however, the evolutionary algorithm still ensured the selection of the best possible solutions within the given constraints. The NSGA-II algorithm demonstrated the ability to generate a set of compromise solutions and made it possible to identify alternative optimal options depending on priorities – minimal cost, minimal mass, or a balanced configuration. A comparison of computational efficiency showed that the performance of NSGA-II declines significantly as the number of samples increases, which is an important factor when choosing an algorithm for practical applications. The results confirm that genetic algorithms are a powerful method for searching optimal configurations of impact-resistant surfaces in physical modelling tasks. The findings can be used for further improvement of automated design systems, integration of multi-objective optimization, and extension to more complex and realistic impact models.

Keywords: automatic design, evolutionary algorithm, physical modeling, artificial intelligence.

References

- [1] N. Bheel, B.S. Mohammed, and E.L., “Woen Modeling and optimizing the impact resistance of engineered cementitious composites with Multiwalled carbon nanotubes using response surface methodology,” *Scientific Reports* vol. 14, no. 1, article 24107, 2024. doi: 10.1038/s41598-024-75641-5.
- [2] Y. Ben-Zion, R. Einhorn Zarzecki, J. Glazer, and N.D. Finkelstein, “Leveraging AI for Rapid Generation of Physics Simulations in Education: Building

- Your Own Virtual Lab,” *The Physics Teacher*, vol. 63, no. 6, pp. 424-427, 2025. doi: 10.1119/5.0252343.
- [3] A. Slowik, and H. Kwasnicka, “Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems,” *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 16, pp. 12363-12379, 2020. doi: 10.1007/s00521-020-04832-8.
- [4] Z. Zhao, B. Liu, C. Zhang, and H. Liu, “An improved adaptive NSGA-II with multi-population algorithm,” *Applied Intelligence*, vol. 49, no. 2, pp. 569–580, 2018. doi: 10.1007/s10489-018-1263-6.
- [5] A. Pétrowski, and S. Ben-Hamida, “Multi-objective Optimization,” in *Evolutionary Algorithms*. Hoboken, USA, 2017, pp. 165-182. doi: 10.1002/9781119136378.ch5.
- [6] Y. Yuan, H. Xu, and B. Wang, “An improved NSGA-III procedure for evolutionary many-objective optimization,” in *Proc. of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, Vancouver, Canada, July 12-16, 2014, pp. 661-668. doi: 10.1145/2576768.2598342.
- [7] W. Whitney, S. Rana, J. Dzuber, and K.E. “Mathias, Evaluating evolutionary algorithms,” *Artificial Intelligence*, vol. 84, no. 1-2, p. 357-358, 1996. doi: 10.1016/0004-3702(96)81371-3.
- [8] L.A. Scardua, “Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition,” in *Applied Evolutionary Algorithms for Engineers Using Python*, 2021, pp. 149-158. doi: 10.1201/9780429298028-12.
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002. doi: 10.1109/4235.996017.
- [10] K. Deb, and H. Jain, “An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 18, no. 4, pp. 577-601, 2014. doi: 10.1109/tevc.2013.2281535.
- [11] A.A. Keller, “Metaheuristic Optimization Algorithms,” in *Multi-Objective Optimization In Theory and Practice II: Metaheuristic Algorithms*, 2019, pp. 54-83. doi: 10.2174/9781681087054119010004.
- [12] J. Domínguez, O. Montiel, R. Sepúlveda, and N. Medina, “High Performance Architecture for NSGA-II,” in *Recent Advances on Hybrid Intelligent Systems*. Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 451-461. doi: 10.1007/978-3-642-33021-6_35.
- [13] L.A. Scardua, “Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm II,” in *Applied Evolutionary Algorithms for Engineers Using Python*, 2021, pp. 137-148. doi: 10.1201/9780429298028-11.

Стаття надійшла 30.10.2025

Стаття прийнята 09.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Сергієнко А. В., Волобуєв Є. С. Дослідження використання генетичних алгоритмів для автоматизованого проектування ударостійких поверхонь. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350946>.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ
КОМПЛЕКТУЮЧИХ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО АЛГОРИТМУ СААТІ

Ситник М.В.

магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, e-mail: makspro1139@gmail.com;

Піднебесна Г.А.

канд. техн. наук, ст. викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5735-9861>, e-mail: halyna.pidnebesna@gmail.com

У статті розглядається проблема оптимального вибору комплектуючих для персональних комп'ютерів у медичних закладах в умовах обмеженого бюджету та множини критеріїв оцінки. Обґрунтовано застосування адаптованого методу аналізу ієрархій Томаса Сааті як ефективного інструменту для математично обґрунтованого багатокритеріального вибору компонентів з урахуванням технічної сумісності, енергетичного балансу та користувацьких пріоритетів. Наведено конкретні приклади застосування методу з демонстрацією чотирьох сценаріїв з різними пріоритетами параметрів та трьох режимів оптимізації. Представлено систему динамічного балансування вагових коефіцієнтів з підтримкою блокування окремих параметрів, що забезпечує постійну суму ваг рівну 100% при збереженні пропорційності незаблокованих параметрів. Експериментальна валідація підтвердила високу точність алгоритму у відслідковуванні встановлених користувачем пріоритетів.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій, багатокритеріальний вибір, підбір комплектуючих, медичні заклади, динамічне балансування параметрів, оптимізація рішень, IT-інфраструктура.

Постановка проблеми

Сучасні медичні заклади все більше залежать від ефективного IT-забезпечення для функціонування медичних інформаційних систем, ведення електронної документації пацієнтів та автоматизації адміністративних процесів. За даними Міністерства охорони здоров'я України, станом на 2024 рік, понад 85% первинних медичних закладів потребують модернізації комп'ютерного парку, при цьому середній бюджет на IT-забезпечення однієї установи становить лише 15-25 тисяч доларів США на рік.

Ринок комп'ютерної техніки характеризується експоненціальним зростанням асортименту компонентів, складністю їх взаємодії та різноманітністю критеріїв оцінки якості. Така різноманітність створює складність вибору оптимальної конфігурації навіть для досвідчених IT-фахівців.

Проблема ускладнюється необхідністю врахування множини взаємопов'язаних факторів, таких як:

- технічна сумісність компонентів,
- енергетичний баланс системи,
- фізичні обмеження,
- різні пріоритети користувачів – від мінімізації витрат до максимізації продуктивності для специфічних медичних застосувань.

Традиційні методи підбору комплектуючих, що базуються на емпіричному досвіді або простому порівнянні характеристик, виявляються недостатньо ефективними для прийняття оптимальних рішень в умовах багатокритеріальності. Для медичних закладів, які часто працюють в умовах обмеженого бюджету та потребують стандартизації IT-інфраструктури, особливо критичною є потреба у науково обґрунтованому підході до вибору обладнання. Тому актуальною є

розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, яка поєднує математично обґрунтований багатокритеріальний аналіз з автоматизованою перевіркою сумісності та можливістю гнучкого налаштування пріоритетів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Огляд існуючих підходів до підбору комплектуючих та аналіз сучасних систем підтримки прийняття рішень у сфері конфігурації комп'ютерних систем дозволяє виділити чотири основні підходи:

1. Параметричний фільтраційний підхід (Hotline.ua) [1], заснований на багаторівневій фільтрації товарів за технічними характеристиками. Система пропонує інструмент «Зібрати комп'ютер» з базовою перевіркою сумісності.

Переваги: повна прозорість процесу, гнучкість фільтрації, актуальність цінової інформації.

Недоліки: відсутність інтелектуального аналізу, неповна перевірка сумісності, пасивна роль системи, необхідність експертних знань у користувача.

2. Експертно-рекомендаційний підхід (BRAIN.com.ua) [2] впроваджує концепцію «готових рішень» – попередньо сконфігурованих систем для різних сценаріїв (офісний ПК, ігровий, робоча станція). Система пропонує калькулятор живлення та попередження про потенційні вузькі місця.

Переваги: зниження порогу входу для невідготовлених користувачів, гарантована сумісність у готових конфігураціях, врахування енергетичного балансу.

Недоліки: обмежена кількість готових конфігурацій, статичність експертних рекомендацій, суб'єктивність класифікації.

3. Краудсорсинговий підхід (Міжнародна платформа PCPartPicker) [3] реалізує найбільш комплексну автоматизовану перевірку сумісності: фізичну (довжина відеокарти, висота кулера), електричну (потужність БЖ, наявність роз'ємів), інтерфейсну (тип пам'яті, версія PCIe), програмну (підтримка процесора BIOS материнської плати).

Переваги: найбільш комплексна перевірка сумісності, агрегація цін від 40+ магазинів, історія цін, база з 5+ мільйонів користувацьких конфігурацій.

Недоліки: пасивна роль у прийнятті рішень, відсутність формалізованого багатокритеріального аналізу, можливі помилки для нових компонентів.

4. Спрощена оптимізація (Telemart.ua) [4] впроваджує спрощену версію багатокритеріальної оптимізації через «профілі використання», яка базується на відповідях користувача на опитувальник про призначення системи та пріоритети, після чого система генерує 3-5 альтернативних конфігурацій.

Переваги: активна роль системи, врахування індивідуальних пріоритетів, автоматизація вибору.

Недоліки: спрощена модель оптимізації, фіксовані вагові коефіцієнти для профілів, алгоритм прийняття рішень не є прозорим.

Порівняльний аналіз чотирьох існуючих підходів виявив спільні системні обмеження: відсутність формалізованого багатокритеріального аналізу, обмежену персоналізацію, статичність критеріїв оцінки та пасивну роль системи у прийнятті рішень.

Проведений аналіз обґрунтовує необхідність розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, що поєднує математично коректний метод Сааті з інтерактивним управлінням ваговими коефіцієнтами, динамічним балансуванням параметрів, механізмами збереження конфігурацій та комплексною валідацією результатів. Саме ці функціональні вимоги реалізовано у розробленому програмному застосунку.

Мета статті

Метою роботи є покращення системи підтримки прийняття рішень, яка забезпечує математично обґрунтований відбір комплектуючих на основі багатокритеріального аналізу з можливістю гнучкого налаштування пріоритетів користувача та збереження конфігурацій.

Метою статті є висвітлення особливостей адаптації методу аналізу ієрархій Т. Сааті для задачі багатокритеріального підбору комп'ютерних компонентів та демонстрація його практичного застосування в контексті оптимізації ІТ-витрат медичних закладів з урахуванням технічної сумісності, енергетичного балансу та динамічного балансування користувацьких пріоритетів.

Виклад основного матеріалу

Математичною основою системи вибрано метод аналізу ієрархій Сааті (АНР) [5-7]. Такий вибір є

доцільним для задачі підбору комплектуючих, оскільки дозволяє формалізувати багатокритеріальний вибір, коли рішення залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів – вартості, якості, надійності, сумісності, строку постачання тощо. АНР дає можливість структурувати задачу у вигляді ієрархії: мета → критерії → альтернативи, що робить процес вибору прозорим та логічним.

Методологія аналізу ієрархій (MAI) [8] представляє собою систематизовану технологію структурування та дослідження складних рішень, фундаментом якої є математичний апарат та психологічні концепції. Суть підходу полягає у забезпеченні кількісної оцінки ваговитості критеріїв під час вироблення управлінських рішень. Фундаментом методології виступає структуризація завдання вироблення рішень через багаторівневу ієрархічну побудову. Така ієрархічна конструкція виступає абстрактним представленням системи, що полегшує дослідження функціональних взаємодій складових та їхнього впливу на систему в цілому.

Метод дозволяє кількісно оцінити навіть якісні критерії через попарні порівняння, зменшуючи суб'єктивність рішення. Завдяки обчисленню власних ваг критеріїв АНР забезпечує узгодженість суджень, що важливо для уникнення помилкових рішень при складних виборах. Крім того, метод дозволяє легко тестувати різні сценарії, змінювати ваги критеріїв і одразу отримувати оновлений рейтинг комплектуючих. Це робить АНР ефективним інструментом для обґрунтованого, системного й аргументованого вибору оптимального варіанта серед кількох доступних альтернатив.

Класичний метод аналізу ієрархій, запропонований Т. Сааті у 1970-х роках, було адаптовано для специфіки підбору комп'ютерних комплектуючих з урахуванням особливостей предметної області. Основні етапи адаптованого методу включають структурування задачі, нормалізацію даних, побудову матриць попарних порівнянь, розрахунок локальних та глобальних пріоритетів.

Основні архітектурні рішення системи.

Для розробки інформаційної системи інтелектуального підбору комп'ютерних комплектуючих було застосовано комплекс сучасних програмних технологій та бібліотек, що забезпечують функціональність, продуктивність та безпеку додатку [9-15].

Обрані технологічні рішення забезпечують оптимальний баланс між продуктивністю, функціональністю та зручністю розробки, дозволяючи створити надійну та масштабовану систему інтелектуального підбору комп'ютерних комплектуючих.

Центральним елементом логічного блоку є клас [27] Application, який наслідується від QMainWindow та виступає головним контролером усієї системи. Цей клас інтегрує всі функціональні модулі програми, координує взаємодію між графічним інтерфейсом та обчислювальним ядром, керує потоком даних між

компонентами системи. Клас Application забезпечує комплексну логіку роботи всіх підсистем.

Система динамічного балансування параметрів. Ключовою інновацією є механізм динамічного балансування вагових коефіцієнтів через клас ParameterBalancer. Цей клас забезпечує пропорційний розподіл вагових коефіцієнтів при зміні значень окремих параметрів, підтримку механізму блокування параметрів для фіксації їх значень, автоматичний перерахунок незаблокованих параметрів при зміні будь-якого з них, валідацію коректності розподілу ваг та перевірку суми параметрів, тобто забезпечує:

- постійну суму параметрів рівну 100% при будь-яких змінах;
- можливість блокування окремих параметрів для фіксації їх значень;
- автоматичний перерахунок незаблокованих параметрів пропорційно їх поточним значенням;
- коригування помилок округлення для гарантії точної суми.

Алгоритм балансування забезпечується наступними кроками.

1. Ініціалізація: Для М параметрів початкові значення: 100/М відсотків кожен.
2. Зміна параметра: При зміні параметра k на нове, визначається залишок від 100%.
3. Віднімання заблокованих.
4. Пропорційний розподіл.

Багаторівнева система фільтрації. Для кожного типу компонента виконується багатоетапна фільтрація даних з таблиць Excel, яка включає фільтрацію за виробником (для процесорів – Intel або AMD), фільтрацію за наявністю інтегрованої графіки, фільтрацію за сумісністю компонентів (сокет процесора, форм-фактор, тип пам'яті), фільтрацію за фізичними обмеженнями (розмір корпусу, довжина відеокарти) та фільтрацію за режимом оптимізації (економія, баланс, продуктивність).

Метод processing послідовно обробляє всі типи комплектуючих з багатоетапною фільтрацією:

1. Фільтрація за виробником: Intel, AMD або «Всі виробники»
2. Фільтрація за графікою: перевірка наявності принаймні одного варіанту (інтегрована або дискретна)
3. Фільтрація за сумісністю:
 - Сокет процесора = сокет материнської плати.
 - Тип пам'яті (DDR4/DDR5) процесора та МП співпадають.

- Форм-фактор МП відповідає корпусу.
- Довжина відеокарти $\leq$ простір у корпусі.

4. Енергетичний баланс:

$$\sum \text{Споживання} \times 1.4 \rightarrow \text{Підбір БЖ.}$$

5. Режими оптимізації:

- «Економія»: нижні 33% або max 300 варіантів
- «Баланс»: 33-66 перцентиль або 300 варіантів.
- «Продуктивність»: верхні 33% або max 300 варіантів.

Режим оптимізації визначає діапазон цін компонентів для розгляду алгоритмом. Обробка компонентів відбувається у визначеній послідовності, що забезпечує врахування взаємних залежностей.

Послідовність обробки: Процесор $\rightarrow$ Материнська плата $\rightarrow$ Оперативна пам'ять $\rightarrow$ Система охолодження $\rightarrow$ Відеокарта $\rightarrow$ Корпус $\rightarrow$ Монітор $\rightarrow$ Накопичувачі $\rightarrow$ Периферія $\rightarrow$ Блок живлення $\rightarrow$ ДБЖ.

Для демонстрації методу розглянемо вибір процесора з бази даних, яка містить 347 моделей процесорів. Вибір відбувався за чотирма сценаріями.

Сценарій 1: Рівномірний розподіл (20% кожен) $\rightarrow$ Intel Xeon E5-1650 V4 (6 ядер, 4,0 GHz турбо, TDP 140 Вт, 28,51 USD). Загальна вартість: 937,05 USD. Компромісне рішення з балансом параметрів.

Сценарій 2: Пріоритет ціни (100% ціна) $\rightarrow$ Intel Celeron E1600 (2 ядра, 2,4 GHz, 14 USD). Загальна вартість: 657,22 USD (-29,9%). Демонструє ризик екстремальної оптимізації: застарілий процесор 2008 року, непридатний для сучасних медичних систем.

Сценарій 3: Багатопоточність (49% ядра + 51% турбочастота) $\rightarrow$ Intel Xeon E5-2650 V4 (12 ядер, 2,9 GHz турбо, 74 USD). Загальна вартість: 1008,72 USD (+7,6%). Кількість ядер збільшилась удвічі, точно відповідаючи пріоритету.

Сценарій 4: Частота + Ефективність (66% турбо + 19% база + 15% TDP) $\rightarrow$ Intel Core i5-10105F (4 ядра, 3,7/4,4 GHz, TDP 65 Вт, 81,16 USD). Загальна вартість: 734,91 USD (-21,6%). Найвища частота (4,4 GHz) при найнижчому TDP (65 Вт), сучасна платформа 2021 року.

Для оцінки роботи системи у різних ценових сегментах проведено тестування з однаковими пріоритетами (баланс 20%), але різними режимами. Різниця у вартості збірок між режимами «Економія» (612 USD), «Баланс» (1045 USD) та «Продуктивність» (3084 USD) показала адекватне масштабування конфігурацій (таблиця 1).

Таблиця 1

Порівняльний аналіз трьох режимів оптимізації

Параметр	Економія	Баланс	Продуктивність
ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ			
Ціновий сегмент	Нижні 33%	33-66%	Верхні 33%
Загальна вартість (\$)	612.49	1045.49	3084.44

Продовження таблиці 1

Параметр	Економія	Баланс	Продуктивність
Співвідношення	1.0×	1.7×	5.0×
ПРОЦЕСОР			
Модель	Intel Core i5-7320	AMD Ryzen 5 7600	Intel Core i9-14900
Покоління	7-ме (Kaby Lake)	Zen 4 (2023)	14-ме (Raptor Lake)
Ядра / Потоки	4 / 4	6 / 12	24 / 32
Максимальна частота (GHz)	3,6	5,1	5,8
TDP (Вт)	65	65	219
Ціна (\$)	72,80	189,99	567,72
Частка у бюджеті	11,9%	18,2%	18,4%
МАТЕРИНСЬКА ПЛАТА			
Модель	Asus PRO Q570M	MSI MAG B650M	Asus PRIME Z790-V
Чіпсет	Q570 (Intel)	B650 (AMD)	Z790 (Intel)
Підтримка пам'яті	DDR4	DDR5	DDR5
Ціна (\$)	154,00	187,17	239,99
Частка у бюджеті	25,1%	17,9%	7,8%
ОПЕРАТИВНА ПАМ'ЯТЬ			
Обсяг (ГБ)	16-24	32	48
Тип	DDR4-2400	DDR5-5200	DDR5-6400
Ціна (\$)	37,00	119,99	239,99
НАКОПИЧУВАЧ			
Інтерфейс	SATA III	NVMe PCIe 4.0	NVMe PCIe 5.0
Швидкість читання (МБ/с)	500	7000	12000
Обсяг (ГБ)	240	500	2000
ВІДЕОКАРТА			
Наявність	Інтегрована	Інтегрована	NVIDIA RTX 4070 (12GB)
ПРИДАТНІСТЬ			
Електронний документообіг	✓ Відмінно	✓ Відмінно	✓ Відмінно
Медична інформаційна система	✓ Прийнятно	✓ Відмінно	✓ Відмінно
Обробка рентген-знімків	✗ Обмежено	✓ Прийнятно	✓ Відмінно
3D-реконструкція МРТ/КТ	✗ Непридатно	✗ Обмежено	✓ Відмінно
Тривалість експлуатації (років)	3-5	5-7	7-10
ВИСНОВОК	Базові офісні задачі	Універсальне рішення	Діагностичні центри

Результати та їх обговорення

Експериментальне тестування підтвердило наступні переваги системи вибору комплектуючих на базі адаптованого методу аналізу ієрархій Сааті:

- Точність дотримання пріоритетів: Система обирає компоненти, що максимально відповідають ваговим коефіцієнтам. Сценарій з пріоритетом ціни

обрав найдешевший процесор (14 USD), сценарій з пріоритетом ядер – процесор з 12 ядрами, сценарій з пріоритетом частоти – процесор з 4,4 GHz.

- Гнучкість налаштування: Можливість інтерактивної зміни пріоритетів у реальному часі з автоматичним перерахунком результатів за 0,5-1,5 секунди.

- Математична обґрунтованість: метод Сааті забезпечує коректний вибір на відміну від емпіричних

підходів. Індекс узгодженості всіх матриць не перевищував 5,4% при нормі <10%.

- Багаторівнева валідація: Система перевіряє 15+ параметрів сумісності перед запуском, що виключає технічно неможливі конфігурації.

- Збереження конфігурацій: Криптографічний захист Fernet AES-128 з PBKDF2HMAC (100000 ітерацій) забезпечує безпеку налаштувань.

Водночас виявлено необхідність впровадження додаткових механізмів: фільтрації за актуальністю компонентів, встановлення мінімальних порогів продуктивності, інтеграції з онлайн-агрегаторами цін, модуля прогнозування довгострокових витрат.

Напрямами подальших досліджень є: розширення бази даних за рахунок автоматизованого веб-скрейпінгу, додавання модуля machine learning для прогнозування ймовірності виходу з ладу компонентів, розробка мобільного додатку для швидкої оцінки конфігурацій, масштабування системи для корпоративних клієнтів з централізованим управлінням ІТ-парком.

Висновки

Розроблена система динамічного балансування параметрів з підтримкою блокування окремих критеріїв значно спрощує процес налаштування конфігурації порівняно з класичним методом. Порівняльний аналіз з існуючими підходами (Hotline.ua, BRAIN.com.ua, PCPartPicker, Telemart.ua) показав, що розроблена система є єдиною, яка поєднує математично обґрунтований багатокритеріальний аналіз, комплексну перевірку сумісності, динамічне балансування параметрів та криптографічний захист конфігурацій. Експериментальна валідація на чотирьох сценаріях продемонструвала високу точність алгоритму у відслідковуванні встановлених користувачем пріоритетів.

Для медичних закладів застосування методу дозволяє оптимізувати витрати на ІТ-забезпечення до 38% за 3 роки експлуатації при збереженні необхідного рівня продуктивності. Економічний аналіз на прикладі КНП «Драбівський центр ПМД» показав економію 5052 USD на 8 робочих станцій за 3 роки.

Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування адаптованого методу аналізу

ієрархій Т. Сааті для задачі багатокритеріального вибору комп'ютерних комплектуючих у медичних закладах.

Перелік використаних джерел

- [1] Hotline. URL: <https://hotline.ua/ua/help/> (дата звернення 20.10.2025).
- [2] Brain. URL: <https://brain.com> (дата звернення 20.10.2025).
- [3] PCPartPicker. URL: <https://pcpartpicker.com/> (дата звернення 20.10.2025).
- [4] Telemart. URL: <https://telemart.com> (дата звернення 20.10.2025).
- [5] Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 1980. 287 p.
- [6] Файнзільберг Л. С., Жуковська О. А., Якимчук В. С. Теорія прийняття рішень. Київ: Освіта України, 2018. 246 с.
- [7] Синенко М. А. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень на прикладі підприємства малого бізнесу. *Інтелект XXI*. 2018. № 1. С. 235-238.
- [8] Basak I., Saaty T. Group decision making using the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*. 1993. Vol. 17, № 4-5. Pp. 101-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90179-3](https://doi.org/10.1016/0895-7177(93)90179-3).
- [9] Huang L. Normalization Techniques in Deep Learning. Springer International Publishing, 2022. 110 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-14595-7>.
- [10] Python Reference Manual. Release 2.4.4. URL: <https://docs.python.org/release/2.4.4/ref/ref.html> (дата звернення 20.10.2025).
- [11] Qt Software. URL: <http://www.qtsoftware.com/> (дата звернення 20.10.2025).
- [12] Introducing JSON. URL: <https://www.json.org/json-en.html> (дата звернення 20.10.2025).
- [13] Krasner G. E., Pope S. T. A cookbook for using the Model-View-Controller user interface paradigm in Smalltalk-80. *Journal of Object-Oriented Programming*. 1988. Vol. 1(3). Pp. 26-49.
- [14] Python bindings for the Qt cross-platform application and UI framework. URL: <https://pypi.org/project/Py-Side6/> (дата звернення 20.10.2025).
- [15] Fernet (symmetric encryption). URL: <https://cryptography.io/en/latest/fernet/> (дата звернення 20.10.2025).

INTELLIGENT SYSTEM FOR MULTI-CRITERIA COMPONENT SELECTION BASED ON DYNAMIC SAATY ALGORITHM

Sytnyk M.V.

master's student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», m. Kyiv, e-mail: makspro1139@gmail.com;

Pidnebesna H.A.

PhD (Engineering), senior lecturer, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute»; Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5735-9861>, e-mail: halyna.pidnebesna@gmail.com

The article addresses the problem of optimal selection of components for personal computers in healthcare facilities under conditions of limited budget and multiple evaluation criteria. It is determined that traditional methods of component selection based on empirical experience or simple comparison of characteristics are insufficiently effective for making optimal decisions in multi-criteria choice situations. The application of Thomas Saaty's adapted Analytical Hierarchy Process (AHP) as an effective tool for mathematically grounded multi-criteria component selection is substantiated, taking into account technical compatibility, energy balance, and user priorities. A system of dynamic weight coefficient balancing with support for blocking individual parameters is presented, ensuring a constant sum of weights equal to 100% while maintaining proportionality of unlocked parameters. A multi-level component filtering system has been developed considering technical compatibility (sockets, form factors, memory types), system energy balance, physical constraints, and three optimization modes. A detailed comparative analysis of existing approaches to component selection in the Ukrainian and global markets has been conducted, revealing their limitations and advantages. Specific examples of applying the method when choosing a processor for a healthcare facility are provided, demonstrating four scenarios with different parameter priorities and three optimization modes. Experimental validation confirmed high algorithm accuracy in tracking user-defined priorities. An economic efficiency analysis of the developed system application has been conducted, demonstrating potential savings of up to 25% of the IT budget for healthcare institutions while maintaining the required performance level.

Keywords: analytical hierarchy process, multi-criteria selection, component selection, healthcare facilities, dynamic parameter balancing, decision optimization, IT infrastructure.

References

- [1] Hotline. [Online]. Available: <https://hotline.ua/ua/help/>. Accessed on: October 20, 2025.
- [2] Brain. [Online]. Available: <https://brain.com>. Accessed on: October 20, 2025.
- [3] PCPartPicker. [Online]. Available: <https://pcpartpicker.com/>. Accessed on: October 20, 2025.
- [4] Telemart. [Online]. Available: <https://telemart.com>. Accessed on: October 20, 2025.
- [5] Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 1980. 287 p.
- [6] L.S. Fainzilberh, O.A. Zhukovska, and V.S. Yakymchuk, *Teoriia pryiniattia rishen* [Decision-making theory]. Kyiv, Ukraine: Osvita Ukrainy Publ., 2018. (Ukr.)
- [7] M.A. Synenko, "Metod Saati pry pryiniatti upravlin-skykh rishen na przykladi pidpriemstva maloho biznesu" ["Saaty's method decision-making on the example of a small business enterprise"], *Intelekt XXI – Intellect XXI*, № 1, pp. 235-238, 2018. (Ukr.)
- [8] I. Basak, and T. Saaty, "Group decision making using the analytic hierarchy process," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 17, № 4-5, pp. 101-109, 1993. doi: 10.1016/0895-7177(93)90179-3.
- [9] L. Huang, *Normalization Techniques in Deep Learning*. Springer International Publishing, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-14595-7>.
- [10] Python Reference Manual. Release 2.4.4. [Online]. Available: <https://docs.python.org/release/2.4.4/ref/ref.html>. Accessed on: October 20, 2025.
- [11] Qt Software. [Online]. Available: <http://www.qtsoftware.com/>. Accessed on: October 20, 2025.
- [12] Introducing JSON. [Online]. Available: <https://www.json.org/json-en.html>. Accessed on: October 20, 2025.
- [13] G.E. Krasner, and S.T. Pope, "A cookbook for using the Model-View-Controller user interface paradigm in Smalltalk-80," *Journal of Object-Oriented Programming*, vol. 1(3), pp. 26-49, 1988.
- [14] Python bindings for the Qt cross-platform application and UI framework. [Online]. Available: <https://pypi.org/project/PySide6/>. Accessed on: October 20, 2025.
- [15] Fernet (symmetric encryption). [Online]. Available: <https://cryptography.io/en/latest/fernet/>. Accessed on: October 20, 2025.

Стаття надійшла 17.11.2025

Стаття прийнята 01.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Ситник М. В., Піднебесна Г. А. Інтелектуальна система багатокритеріального вибору комплектуючих на основі динамічного алгоритму Сааті. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 33-38. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350947>.

МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ АНАЛІЗУ ТЕМПІВ
КАР'ЄРНОГО РОЗВИТКУ СПІВРОБІТНИКІВ ІТ-КОМПАНІЙ

Сиротенко О.Г.	магістр, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9614-9056 , e-mail: olena.syrotenko@nure.ua ;
Петрова Р.В.	канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5886-8943 , e-mail: roksana.petrova@nure.ua ;
Морозова А.І.	канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7082-4115 , e-mail: anna.morozova@nure.ua

У статті детально досліджується використання методів машинного навчання в задачах управління людськими ресурсами в ІТ-компаніях. В умовах високої конкуренції за кваліфіковані кадри, розуміння та прогнозування кар'єрного розвитку співробітників стає ключовим фактором для їх утримання та мотивації. Використання інструментів машинного навчання дозволяє виявити приховані закономірності у великих обсягах HR-даних і сформулювати об'єктивну та ефективну картину розвитку персоналу. Метою роботи є аналіз можливостей використання методів машинного навчання для визначення динаміки кар'єрного розвитку співробітників ІТ-компаній. Завданнями роботи є формування практичного алгоритму виявлення груп фахівців за ефективністю їхнього розвитку та оцінка чинників, що впливають на темпи кар'єрного зростання. У процесі дослідження використано комплекс методів інтелектуального аналізу даних та машинного навчання, що включають методи кластеризації (метод К-Means, метод головних компонент), методи оцінки якості кластеризації (силуетний коефіцієнт), методи регресійного аналізу (лінійна регресія, В-сплайн регресія) та методи оцінки якості регресійного аналізу (метод кореня середньоквадратичної помилки, коефіцієнт детермінації). У роботі виконано попередню обробку експериментальних даних, сформульовано ознаки ефективності зростання та застосовано методи кластеризації для виявлення схожих груп співробітників за сформульованими ознаками. Також досліджено взаємозв'язок між чинником «кількість проектів» та темпами кар'єрного розвитку із подальшою оцінкою його впливу з використанням методів регресійного аналізу. У результаті дослідження виокремлено три основні групи співробітників: з високим темпом зростання, без зростання та з нестабільним зростанням. Виявлено статистично значущий вплив кількості проектів на темпи кар'єрного розвитку та нелінійну залежність між цими ознаками. Практична значущість роботи полягає в тому, що розроблені моделі та підходи можуть бути інтегровані в HR-системи ІТ-компаній для об'єктивної оцінки персоналу, формування кадрового резерву та розробки персоналізованих планів розвитку.

Ключові слова: ІТ-компанія, інтелектуальний аналіз даних, інформаційні технології, кар'єрний розвиток, кластеризація, машинне навчання, оптимізація, регресійний аналіз.

Постановка проблеми

Інформаційні технології є однією з найдинамічніших галузей сучасної економіки, що характеризується високими темпами розвитку та постійними технологічними змінами.

ІТ-компанії функціонують у висококонкурентному середовищі, де ключовим ресурсом є кваліфіковані фахівці. На відміну від традиційних галузей, де основу створюють матеріальні активи та технологічне обладнання, в ІТ-сфері інтелектуальний потенціал співробітників безпосередньо впливає на якість продукту, швидкість інновацій та здатність адаптуватися до ринкових змін.

Високий рівень мобільності ІТ-спеціалістів перетворює утримання співробітників на стратегічний пріоритет. Втрата ключового співробітника може призвести не лише до прямих фінансових витрат на заміщення позиції, але й до втрати критичних знань та порушення проектних термінів.

Традиційні підходи до управління персоналом, розроблені для стабільних галузей з передбачуваними кар'єрними шляхами, виявляються неефективними [1] в динамічному ІТ-середовищі, де вимоги до компетенцій співробітника змінюються відповідно до темпів розвитку інформаційних технологій.

ІТ-компанії накопичують значну кількість історичних даних про кар'єру співробітників, включаючи їхній досвід, технічні навички, кількість проектів, в яких брав участь співробітник, його роль у проекті, тривалість роботи на проекті, тривалість перебування на посаді, рівень заробітної плати, географічне розташування, рівень освіти, сертифікати, оцінка ефективності з боку команди та менеджерів тощо.

Це створює передумови для застосування інтелектуальних методів аналізу даних та машинного навчання, які здатні виявляти приховані закономірності та тренди, зокрема для прогнозування персонального кар'єрного розвитку співробітника та визначення загальних чинників впливу на темпи кар'єрного розвитку

співробітників, покриваючи економічні та стратегічні цілі ІТ-компанії.

Економічні переваги інтелектуального аналізу кар'єрної динаміки співробітників для ІТ-компанії включають:

- зниження витрат на підбір співробітників – ефективне планування кар'єрного розвитку існуючих співробітників зменшує витрати на залучення нового ІТ-спеціаліста;

- зменшення плинності кадрів – наявність персоналізованих планів розвитку позитивно впливає на утримання співробітників в ІТ-компаніях, що впливає на зниження витрат, пов'язаних з плинністю персоналу;

- підвищення продуктивності – співробітники із чіткими перспективами кар'єрного зростання демонструють вищі показники продуктивності та залученості в роботу [2], що впливає на збільшення кількості клієнтів ІТ-компанії.

Стратегічні переваги інтелектуального аналізу кар'єрної динаміки співробітників для ІТ-компанії включають:

- формування кадрового резерву – інтелектуальний аналіз дозволяє виявляти співробітників з високим потенціалом до ключових позицій та заздалегідь готувати їх до них, забезпечуючи безперервність управління;

- підвищення конкурентоспроможності – ІТ-компанії, що ефективно розвивають свій персонал, отримують конкурентні переваги за рахунок вищої кваліфікації команди та здатності швидше впроваджувати інновації.

Актуальність проблеми полягає в необхідності переходу від суб'єктивних оцінок до об'єктивного, керованого даними підходу в управлінні кар'єрою. Використання машинного навчання дозволяє не лише описати поточну динаміку, але й сформулювати підґрунтя для побудови ефективних систем мотивації, розвитку та утримання фахівців.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У дослідженнях HR-асоціації SHRM (Society for Human Resource Management) підкреслюється, що саме можливості кар'єрного розвитку та професійного навчання є ключовим фактором утримання фахівців у технологічному секторі, часто випереджаючи рівень фінансової компенсації [3].

У роботі [4] автори доводять, що неефективне управління кар'єрою та відсутність прозорих, персоналізованих шляхів розвитку є прямим каталізатором високої плинності кадрів. Це, в свою чергу, завдає компаніям значних фінансових збитків, пов'язаних із пошуком, наймом та адаптацією нових спеціалістів.

Ці виклики стимулювали розвиток нового напрямку «People Analytics» [5], що ґрунтується на зборі та інтелектуальному аналізі великих обсягів HR-даних для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Значна частина сучасних наукових праць [6-8] у цій сфері зосереджена на вирішенні задачі прогнозування підвищення (promotion prediction). У цих роботах автори розглядають підвищення як бінарну класифікаційну подію.

У статті [6] автори Ch.Dayakar та P.Pavani пропонують методологію прогнозування, що базується на таких алгоритмах, як Support Vector Machine, Artificial Neural Network та Random Forest. Їхня модель прогнозує, чи буде співробітник підвищений, на основі таких ознак, як вислуга років, рівень продуктивності та бали за пройдене навчання. Ключовим внеском їхньої роботи є вирішення проблеми незбалансованих наборів даних за допомогою техніки ROS (Random Over-Sampling), що дозволило моделі Random Forest досягти 98% точності.

У дослідженні [7] автори порівнюють ефективність Logistic Regression, Random Forest, Gradient Boosting та Decision Tree. Вони використовують набір даних, що включає вік, кількість тренінгів та стаж роботи. У їхньому випадку найвищу точність у 86% показала логістична регресія.

Автори в роботі [8] розширюють цей список, додаючи до порівняння AdaBoost та XGBoost, і в їхньому експерименті найкращі результати демонструє модифікований підхід AdaBoost.

Група авторів [9] пропонує більш комплексний підхід, що виходить за межі простого прогнозування, – рекомендаційні системи для кар'єрних шляхів. Вони критикують застарілу модель «кар'єрної драбини» та описують архітектуру системи «CareerRec», яка використовує ML (зокрема, XGBoost) не для прогнозування, а для рекомендації персоналізованих, нелінійних кар'єрних шляхів на основі профілю навичок фахівця.

У статті [10] автори пропонують метод кластеризації послідовностей (sequence clustering) на основі вбудовування (embedding) для аналізу профілів ІТ-фахівців. Їхній підхід дозволяє виявити неявні зв'язки між посадами та сформувати типові кар'єрні шляхи для кожної групи.

Огляд літератури показує, що більшість праць фокусується на прогнозуванні факту підвищення аналізу структури кар'єрних шляхів, натомість, недостатньо дослідженими залишаються питання аналізу темпів кар'єрного розвитку як динамічної величини, а також класифікація співробітників за шаблонами їхнього зростання.

Мета статті

Метою роботи є формулювання варіантів практичного використання методів машинного навчання для аналізу темпів кар'єрного розвитку співробітників ІТ-компанії, включаючи задачі ідентифікації груп співробітників за ефективністю їхнього кар'єрного розвитку та аналізу ступеня кореляції і впливу професійних

ознак співробітника на ефективність його кар'єрного розвитку.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процес кар'єрного розвитку співробітників в ІТ-компаніях.

Предметом дослідження є методи машинного навчання аналізу динаміки кар'єрного розвитку співробітників ІТ-компанії.

Для валідації запропонованих в роботі підходів використання методів машинного навчання для аналізу темпів кар'єрного розвитку використано експериментальний набір даних, що відображає типові, анонізовані HR-записи ІТ-компанії за період з січня 2023 по лютий 2025 року.

Набір даних складається з двох основних джерел:

- щомісячні звіти про співробітників. Представлені у вигляді набору файлів відповідно до кожного місяця. Кожен запис у цих файлах містить ключові атрибути, що описують стан співробітника на певний місяць, зокрема: ідентифікатор співробітника, команда, посадовий рівень та дата найму;

- дані про проекту діяльність. Цей набір містить деталі про участь співробітників у проектах, включаючи ідентифікатор співробітника, ідентифікатор проекту, дату початку роботи на проекті, дату завершення роботи на проекті та відсоток завантаження.

Методи дослідження включають методи кластеризації (метод К-Means, метод головних компонент), методи оцінки якості кластеризації (силуетний коефіцієнт), методи регресійного аналізу (лінійна регресія, В-сплайн регресія) та методи оцінки якості регресійного аналізу (метод кореня середньоквадратичної помилки, коефіцієнт детермінації).

Метод кластеризації К-Means полягає в розділенні n спостережень на k кластерів, так щоб кожне спостереження належало до кластера з найближчим до нього середнім значенням [11]. Кластеризація є процесом ітеративним і включає визначення центрів та оцінку відстані між кожним спостереженням та присвоєнням йому центру.

Центроїд представляє середнє координат всіх точок кластера за кожною ознакою відповідно до формули (1).

$$m_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x \in S_i} x, \quad (1)$$

де S_i – множина всіх точок, що належать i -ому кластеру;

$|S_i|$ – кількість точок в i -ому кластері;

x – окрема точка, що належить i -ому кластеру.

Відстань між кожним спостереженням та центроїдом визначається як квадратична Евклідова відстань, відповідно до якої спостереження присвоюється центроїду з найменшою квадратичною Евклідовою відстанню, як наведено в формулі (2).

$$S_i^{(t)} = \{x_p: \|x_p - m_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_p - m_j^{(t)}\|^2 \forall j, 1 \leq j \leq k\}, \quad (2)$$

де $S_i^{(t)}$ – i -й кластер на ітерації t ;

x_p – p -та точка даних у наборі даних;

$m_i^{(t)}$ – центроїд i -го кластера на ітерації t ;

$m_j^{(t)}$ – центроїд j -го кластера на ітерації t ;

k – загальна кількість кластерів.

Для візуалізації результатів кластерного аналізу в двовимірному просторі використано метод головних компонент (РСА), який призначений для зменшення розмірності даних з мінімальними втратами. Метод здійснює лінійне перетворення вихідних змінних у нові, незалежні одна від одної головні компоненти, які впорядковуються за спаданням дисперсії. Перша головна компонента відображає найбільше розсіювання у вибірці, остання – найменше розсіювання. Формула (3) відображає процес проектування даних на головні компоненти.

$$Z = X \cdot W, \quad (3)$$

де X – центрована матриця вихідних даних розміром $n \times p$, де n – кількість спостережень, p – кількість ознак;

W – матриця власних векторів розміром $p \times k$, де k – кількість головних компонент.

Для визначення залежностей між ознаками використано методи лінійної регресії та сплайн-регресії на основі В-сплайну.

Лінійна регресія моделює лінійну залежність між скалярною змінною y та векторною змінною X . Модель лінійної регресії наведено у формулі (4) [12].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon, \quad (4)$$

де y – залежна пояснювальна змінна;

β_0 – вільний член;

$(x_1, \dots, x_n)$ – незалежні пояснювальні змінні;

β_n – коефіцієнт моделі;

ε – випадкова похибка, розподіл якої в загальному випадку залежить від незалежних змінних, але математичне сподівання якої дорівнює нулю;

n – кількість ознак (незалежних змінних).

Коефіцієнти підбираються так, щоб мінімізувати суму квадратів відхилень між фактичними та передбаченими значеннями, реалізуючи метод найменших квадратів. Лінійну регресію обрано як перший крок для виявлення глобальних тенденцій перед застосуванням більш гнучкої сплайн-моделі.

Сплайн регресія дозволяє моделювати нелінійні залежності між змінними, розбиваючи простір ознак на окремі ділянки та апроксимуючи їх різними функціями. У цьому підході простір незалежної змінної розбивається на окремі інтервали за допомогою вузлів, а на кожному інтервалі функція апроксимується

поліномом заданого ступеня [13]. Модель В-сплайн регресії наведено у формулі (5).

$$y_i = \beta_1 B_1(x_1) + \dots + \beta_k B_k(x_n) + \varepsilon_i, \quad (5)$$

де $B_k(x)$ – базисна функція В-сплайну;
 k – кількість базисних функцій.

На відміну від лінійної регресії, де вся модель є прямою або гіперплощиною, сплайнова модель дозволяє згинатися в різних точках, краще підлаштовуючись до трендів у даних та забезпечуючи неперервність похідних у вузлах, що дозволяє відображати поведінку залежності в різних діапазонах без втрати гладкості.

Виклад основного матеріалу

На першому етапі дослідження виконано попередню обробку експериментальних даних. Вихідні матеріали склалися з двох анонімізованих наборів: щомісячних звітів про стан співробітників та окремого файлу з даними про їхню проектну діяльність. Після завантаження, консолідації щомісячних файлів в єдину структуру та видалення дублікатів проведено видалення повних дублікатів.

Перед застосуванням методів машинного навчання важливо виконати аудит повноти даних про співробітників, оскільки пропущені значення можуть призвести до викривлення результатів або неможливості застосування певних методів [14].

При виявленні пропущених значень критично важливо оцінити їхній відсоток та загальний вплив на вибірку. Поширеною помилкою є повне видалення рядків з пропусками (listwise deletion), оскільки це може суттєво зменшити обсяг вибірки та, як наслідок, статистичну потужність подальшого аналізу. Тому, при не критичному відсотку пропусків, перевага надається методам заповнення (imputation).

У даному дослідженні, слідуючи цьому підходу, аналіз виявив не критичні пропуски у полі «команда», що становить 10,43%. Щоб зберегти обсяг вибірки, застосовано заповнення маркерами «No Team». В результаті отримано чистий, повний набір даних, валідований на відсутність пропусків, що є необхідною умовою для коректного застосування методів машинного навчання на наступних етапах.

Перед початком аналізу динаміки кар'єрного розвитку додатково введено ієрархію посад, де кожному кар'єрному рівню присвоєно числовий ранг, як наведено в табл. 1. Використання такого словника забезпечить коректне сортування даних при подальшому аналізі та візуалізації, оскільки стандартне алфавітне сортування не відображає реальної ієрархії посад в організації.

Для виявлення груп фахівців за ефективністю їхнього розвитку застосовано метод кластеризації k-середніх.

Таблиця 1

Словник ієрархії посад в ІТ-компанії	
Посада	Рівень
Trainee	1
Junior	2
Middle	3
Senior	4
Lead	5
Expert	6
Associate Director	7
Director	8

В якості вектора ознак ефективності кар'єрного зростання співробітника V_i пропонується використати вектор (6) наступних ознак: індекс зрілості, кількість позицій у кар'єрній траєкторії співробітника в компанії, індекс стабільності зростання та факт підвищення.

$$V_i = (MaturityIndex_i, Levels_i, Stability_i, Grew_i). \quad (6)$$

Завданням методу k-середніх є розділення множини всіх векторів $V = \{V_1, \dots, V_n\}$ на k кластерів, мінімізуючи суму квадратів відстаней від кожного вектора V_i до центроїда його кластера.

Пропонується визначати індекс зрілості відповідно до (7), що дозволить інтегрувати поточний рівень позиції та загальний стаж роботи через зважену комбінацію нормалізованих значень, дозволяючи об'єктивно порівняти співробітників.

$$MaturityIndex = 10 \cdot (\alpha \cdot L + (1 - \alpha) \cdot E), \quad (7)$$

де L – ієрархічне значення поточної позиції співробітника;

E – стаж роботи співробітника в днях;

α – ваговий коефіцієнт важливості рівня посади.

Параметри ієрархічного значення поточної позиції співробітника та стажу роботи мають бути попередньо нормалізованими до діапазону від 0 до 1, з метою забезпечення рівнозначного внеску обох компонентів в індекс зрілості.

Для вагового коефіцієнту α пропонується обрати значення відповідно до суб'єктивної оцінки важливості рівня посади над стажем роботи. В даному експерименті встановлено значення 0,2, що означає, що поточний рівень має вагу 20% в індексі зрілості, тоді як стаж роботи 80%.

Фінальний розрахунок індексу зрілості включає множення зваженої суми нормалізованих значень на коефіцієнт 10 для отримання шкали від 0 до 10.

Кількість позицій у кар'єрній траєкторії співробітника в компанії відповідає розміру множини усіх рівнів посад, які співробітник займав (8):

$$Levels = |\{pos_i \mid (pos_i, _) \in P\}|, \quad (8)$$

де P – кар’єрна траєкторія співробітника, представлена як кортеж всіх його послідовних етапів роботи, $P = [step_1, step_2, \dots, step_n]$, $step_i = (pos_i, days_i)$; pos_i – рівень посади.

Індекс стабільності зростання дозволяє оцінити ефективність кар’єрних переходів: високе значення вказує на послідовне просування вгору по ієрархії, тоді як низьке значення свідчить про повернення на попередні рівні. Пропонується визначати індекс стабільності зростання як відношення кількості унікальних рівнів до загальної кількості переходів (9):

$$Stability = \frac{Levels}{Transitions}, \quad (9)$$

де $Levels$ – кількість позицій у кар’єрній траєкторії співробітника;

$Transitions$ – загальна кількість етапів у кар’єрній траєкторії співробітника, $Transitions = |P|$.

Факт підвищення визначено у вигляді бінарної змінної, яка приймає значення True, якщо співробітник має хоча б 1 підвищення, та False, якщо співробітник залишається на одній позиції (10):

$$Grew = \begin{cases} 1, & Levels > 1 \\ 0, & Levels \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

Кількість кластерів k пропонується визначати експериментально відповідно до оцінки якості кластеризації з використанням силуетного коефіцієнту (11):

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (11)$$

де $a(i)$ – середня відстань від i -го об’єкта до всіх інших об’єктів у тому ж кластері;

$b(i)$ – найменша середня відстань від i -го об’єкта до всіх об’єктів найближчого кластера.

Силуетний коефіцієнт дозволяє кількісно визначити, наскільки добре кожен об’єкт належить до свого кластеру порівняно з іншими. У даному дослідженні оптимальним значенням обрано $k = 3$, при якому силуетний коефіцієнт становить найбільше значення 0,7, що вказує на якість кластеризації вище середньої.

В результаті кластеризації визначено 3 кластери із середніми значеннями ознак ефективності кар’єрного зростання кожного кластеру, як наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Кластери співробітників за ефективністю кар’єрного розвитку

Номер кластеру	Індекс зрілості (<i>MaturityIndex</i>)	Кількість унікальних позицій (<i>Levels</i>)	Індекс стабільності кар’єрного зростання (<i>Stability</i>)	Факт підвищення (<i>Grew</i>)	Категорія кластеру
1	3,57	2,28	1	1	Високоєфективні
2	1,59	1	1	0	Потенційно застійні
3	4,88	2,5	0,75	1	Нестабільні

На основі отриманих результатів можна класифікувати кожен кластер наступним чином:

– кластер 1 містить дані про співробітників з високими показниками зростання, стабільності та середнім індексом зрілості, що свідчить про ефективне зростання співробітників в цьому кластері;

– кластер 2 містить дані про співробітників, які не мали кар’єрного зростання, що свідчить про відсутність кар’єрного розвитку співробітників в цьому кластері;

– кластер 3 включає співробітників із нестабільною динамікою зростання.

Візуалізація кластерів за допомогою PCA (рис. 1) чітко демонструє розділення між групами високоєфективних співробітників («High Growth») та малоефективних («No Growth») співробітників. Натомість кластер нестабільних співробітників («Unstable Growth») представлений лише кількома спостереженнями з великою відстанню від основної маси точок, що визначає аномальний характер даних в цьому кластері, які сильно відрізняються від більшості.

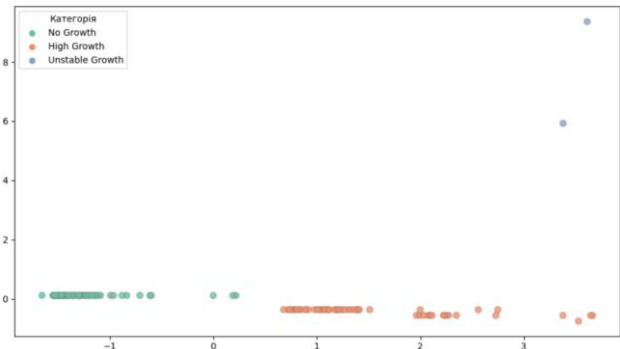


Рис. 1 – Візуалізація кластеризації співробітників за ознаками ефективності кар’єрного зростання

Запропонована кластеризація дозволяє ІТ-компанії застосовувати персоналізовані стратегії управління талантами. Замість того, щоб аналізувати лише факт підвищення, цей метод дає якісну оцінку шаблону розвитку. Це дозволяє ідентифікувати не лише очевидних лідерів, але й приховані групи ризику, які потребують проактивного втручання.

Наприклад, фахівці з групи високоєфективних співробітників можуть бути пріоритезовані для

включення до кадрового резерву. Окрім того, аналіз їхніх успішних траєкторій дає змогу виявити найефективніші кар'єрні шляхи та використовувати їх як основу для корпоративних програм менторства.

На противагу, кластер малоефективних співробітників є ключовим індикатором ризику стагнації та плинності кадрів. Замість того, щоб реагувати на звільнення постфактум, компанія може аналізувати причини відсутності зростання в цій групі та впроваджувати цільові програми для їх утримання.

Особливу аналітичну цінність становить кластер нестабільних працівників. Хоча ці співробітники можуть мати високий індекс зрілості, низький показник стабільності вказує на неефективні «горизонтальні» або «зворотні» кар'єрні переміщення. Для HR-менеджерів це є прямим сигналом для аналізу причин такої нестабільності – проблема в плануванні проєктів, відсутність чіткого кар'єрного бачення тощо.

Для виявлення та оцінки чинників, що впливають на темпи кар'єрного зростання пропонується використати такі методи регресійного аналізу, як лінійна регресія та В-сплайн регресія.

Для оцінки якості регресійної моделі обрано метод кореня середньоквадратичної помилки (RMSE) коефіцієнт детермінації (R^2) [15].

Метод кореня середньоквадратичної помилки є квадратним коренем із середнього значення квадратів різниць між прогнозованими та спостережуваними результатами, як наведено в формулі (12):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (12)$$

де n – загальна кількість спостережень;

y_i – фактичне значення залежної змінної для i -го спостереження;

$\hat{y}_i$ – передбачене значення залежної змінної для i -го спостереження.

Чим менше отримана метрика, тим краща здатність моделі до точного прогнозування. І навпаки, більший результат означає більшу розбіжність між прогнозованими та фактичними результатами. На відміну від методу середньої абсолютної похибки, метод кореня середньоквадратичної помилки більш суворо карає великі помилки за рахунок піднесення до квадрату.

Коефіцієнт детермінації (R^2) оцінює, яку частку дисперсії цільової змінної пояснює модель та обчислюється відповідно до формули (13):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (13)$$

де $\bar{y}$ – середнє фактичне значення залежної змінної.

Коефіцієнт детермінації показує, наскільки краще модель представляє дані в порівнянні з середнім значенням: значення 1 означає ідеальне передбачення, 0

вказує, що модель не краща за просте середнє значення, а від'ємне значення свідчить про те, що модель є гіршою за середнє значення.

Використання лінійної регресії дозволяє виявити глобальні тенденції між обраною ознакою й цільовою та прийняти рішення про доцільність застосування більш гнучкої сплайн-моделі.

Цільовою ознакою є темпи кар'єрного розвитку співробітника, яка описується формулою (14):

$$Growth Rate = \frac{L_{end} - L_{start}}{D/365}, \quad (14)$$

де L_{start} , L_{end} – ієрархічні рівні початкової та поточної позицій співробітника;

$D/365$ – загальна кількість років на посадах.

В якості досліджуваної ознаки в даній роботі розглядається ознака «кількість проєктів». Таким чином, ми формуємо гіпотези:

– H_0 : кількість проєктів не має статистично значущого впливу на темпи кар'єрного зростання;

– H_1 : кількість проєктів має статистично значущий вплив на темпи кар'єрного зростання.

Побудовану лінійну регресійну модель впливу кількості проєктів на темпи кар'єрного розвитку наведено на рис. 2.

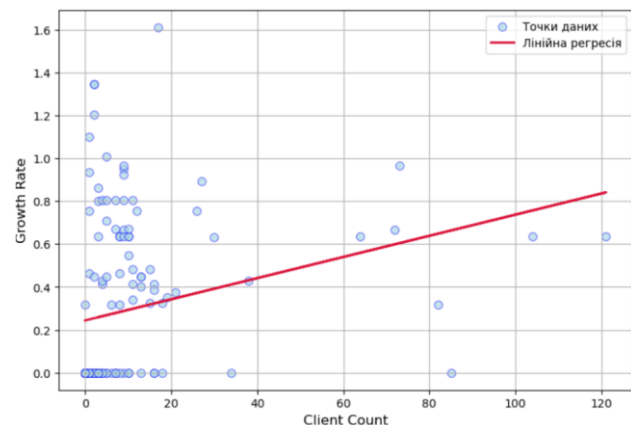


Рис. 2 – Лінійна регресійна модель впливу кількості проєктів на темпи кар'єрного розвитку

Для лінійної регресійної моделі корінь середньоквадратичної помилки становить 0,13; коефіцієнт детермінації дорівнює 0,6.

Статистичний тест підтвердив, що кількість клієнтів має значущий вплив ($p = 0,003 < 0,005$), проте лінійна регресійна модель пояснює близько 6% дисперсії в темпі зростання, що є слабким результатом для практичної інтерпретації.

Таким чином, лінійна модель не є ефективною моделлю для точного прогнозування темпу зростання на основі кількості клієнтів.

У випадку неефективності використання лінійних методів для опису залежностей між ознаками пропонується використати регресійну модель на основі В-

сплайнів. Кількість сплайнів підбирається експериментально, орієнтуючи на результати методів оцінки якості регресії.

В даному дослідженні використано регресійну модель на основі 4 В-сплайнів (рис. 3).

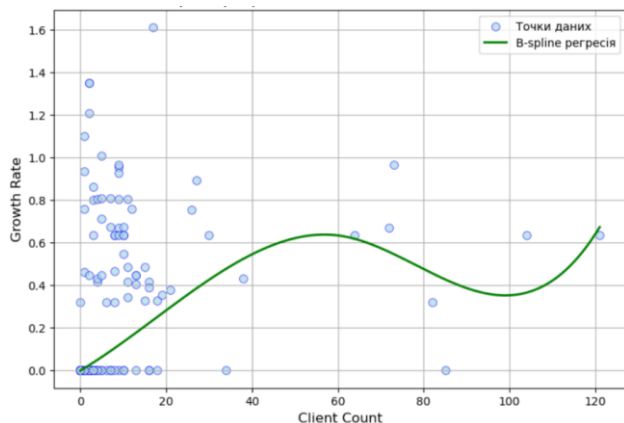


Рис. 3 – Сплайн регресійна модель впливу кількості проєктів на темпи кар'єрного розвитку

Корінь середньоквадратичної помилки сплайн регресійної моделі становить 0,12, а коефіцієнт детермінації дорівнює 0,19.

Можемо визначити, що побудована сплайн регресійна модель є кращою за лінійну, оскільки має менше помилок та вищий коефіцієнт детермінації, проте модель пояснює близько 19% дисперсії, що все ще є невисоким результатом для точного прогнозування, а отже зв'язок між обраними ознаками слабкий.

Незважаючи на це, модель дозволяє визначити, що до 40 клієнтів темпи зростання співробітників були стабільними, а після 40 почали коливатися, а отже занадто високе навантаження клієнтами не гарантує швидкого кар'єрного зростання співробітника.

Застосування запропонованого комплексу регресійних методів (лінійної та В-сплайн регресії) може бути інтегроване у системи «People Analytics» як ефективний інструмент для діагностики та оцінки чинників, що впливають на темпи кар'єрного зростання. Цей підхід дозволяє вийти за межі простих кореляцій та отримати глибоке розуміння характеру взаємозв'язків між ознаками, що дозволить оптимізувати управлінські рішення та уникнути умов, що призводять до професійної стагнації чи вигорання співробітників.

Висновки

У ході дослідження сформульовано та апробовано комплекс практичних методів машинного навчання для аналізу темпів кар'єрного розвитку співробітників ІТ-компанії.

На відміну від більшості існуючих підходів, що фокусуються на бінарному прогнозуванні факту підвищення, дана робота вирішує два ключових аналітичних завдання:

– сформовано практичний алгоритм виявлення груп фахівців за ефективністю їхнього розвитку. Запропоновано набір ознак, який включає факт підвищення, індекс зрілості, кількість позицій та індекс стабільності кар'єрного зростання. Застосування методу кластеризації K-Means на основі цього вектора дозволило успішно виокремити три якісно різні групи співробітників: «Високоєфективні», «Потенційно застійні» та «Нестабільні»;

– сформовано практичний підхід оцінки чинників, що впливають на темпи кар'єрного зростання. Для цього введено динамічну метрику «Growth Rate», що кількісно вимірює швидкість просування кар'єрними сходами. Двохетапний регресійний аналіз на прикладі ознаки «кількість проєктів» дозволив дослідити її нелінійний вплив на темпи кар'єрного розвитку та визначити, що занадто високе навантаження клієнтами не гарантує швидкого кар'єрного зростання.

Запропоновані методи є готовими інструментами для інтеграції в системи «People Analytics». Вони дозволять HR-департаментам перейти від суб'єктивних оцінок до об'єктивної діагностики персоналу, ідентифікувати групи ризику стагнації та оптимізувати управлінські рішення.

Перелік використаних джерел

- [1] Nastase C., Adomnitei A., Apetri A. Strategic Human Resource Management in the Digital Era: Technology, Transformation, and Sustainable Advantage. *Merits*. 2025. Vol. 5, no. 4. Article 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/merits5040023>.
- [2] The Effect of Training and Career Development on Company Performance: A Systematic Literature Review / N. T. Fabian et al. *International Journal of Humanities, Law, and Politics*. 2024. Vol. 2, no. 1. Pp. 19-25. DOI: <https://doi.org/10.46336/ijhlp.v2i1.57>.
- [3] 2025 Employee Benefits Survey. URL: https://www.shrm.org/content/dam/en/shrm/topics-tools/research/employee-benefits/2025_annual_benefits_survey_executive_summary.pdf (дата звернення: 10.10.2025).
- [4] Ullah S., Azeem S. Effect of Employee Retention in the IT Industry. *Global Management Sciences Review*. 2024. Vol. IX, no. II. Pp. 83-89. DOI: [https://doi.org/10.31703/gmsr.2024\(ix-ii\).08](https://doi.org/10.31703/gmsr.2024(ix-ii).08).
- [5] Han Wuen C. The Application of People Analytics to Enhance Decision-Making in Human Resource Management. *Ambidextrous Journal of Innovation Efficiency and Technology in Organization*. 2025. Vol. 2, no. 02. Pp. 88-96. DOI: <https://doi.org/10.61536/ambidextrous.v2i02.179>.
- [6] Dayakar Ch., Pavani P. Machine Learning Based Employee Promotion Prediction. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol 14, no. 08. Pp. 417-423.
- [7] Ansari N., Vora N. Employee Promotion Evaluation and Prediction using Machine Learning. *Journal of*

- Information Technology and Digital World*. 2024. Vol. 6, no. 4. Pp. 317-332. DOI: <https://doi.org/10.36548/jitdw.2024.4.001>.
- [8] Employee Promotion Prediction Using Improved AdaBoost Machine Learning Approach / M. A. Jafor et al. *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*. 2023. Vol. 22, no. 3. Pp. 258-266. DOI: <https://doi.org/10.53799/ajse.v22i3.781>.
- [9] A Machine Learning Approach to Career Path Choice for Information Technology Graduates / H. Al-Dosari et al. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2020. Vol. 10, no. 6. Pp. 6589-6596. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.3821>.
- [10] Zhong H., Liu C., Wu C. Uncovering IT Career Path Patterns with Job Embedding-based Sequence Clustering. *ACM Transactions on Management Information Systems*. 2025. Vol. 16, iss. 2. Pp. 1-32. DOI: <https://doi.org/10.1145/3712705>.
- [11] Hollander M., Wolfe D., Chicken E. *Nonparametric Statistical Methods*. John Wiley & Sons, Inc., 2014. 848 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119196037>.
- [12] Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2021. 704 p.
- [13] Bowman A., Azzalini A. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations*. Oxford University Press, 1997. 204 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198523963.001.0001>.
- [14] Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining Concepts & Techniques*. 3rd ed. Morgan Kaufmann Publishers, 2011. 744 p.
- [15] Harrel F. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*. Springer, 2001. 600 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3462-1>.

MACHINE LEARNING METHODS AS A TOOL FOR ANALYSING THE CAREER DEVELOPMENT PACE OF IT COMPANY EMPLOYEES

Syrotenko O.G.	Master's degree candidate, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9614-9056 , e-mail: olena.syrotenko@nure.ua ;
Petrova R.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5886-8943 , e-mail: roksana.petrova@nure.ua ;
Morozova A.I.	PhD (Engineering), associate professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7082-4115 , e-mail: anna.morozova@nure.ua

The article examines in detail the use of machine learning methods in human resource management tasks in IT companies. In a highly competitive environment for qualified employees, understanding and predicting employee career development becomes a key factor in retaining and motivating them. The use of machine learning tools allows us to identify hidden patterns in large volumes of HR data and form an objective and effective picture of staff development. The purpose of this work is to analyse the possibilities of using machine learning methods to determine the dynamics of career development of IT company employees. The objectives of this work are to develop a practical algorithm for identifying groups of specialists based on the effectiveness of their development and to assess the factors that influence the pace of career growth. The research uses a set of methods of data mining and machine learning, including clustering methods (K-Means method, principal component method), methods for assessing the quality of clustering (silhouette coefficient), methods of regression analysis (linear regression, B-spline regression), and methods for assessing the quality of regression analysis (root mean square error method, coefficient of determination). The paper performs preliminary processing of experimental data, formulates indicators of growth efficiency, and applies clustering methods to identify similar groups of employees based on the formulated indicators. The relationship between the factor «number of projects» and career development rates was also studied, with a subsequent assessment of its impact using regression analysis methods. As a result of the study, three main groups of employees were identified: those with high growth rates, those without growth, and those with unstable growth. A statistically significant impact of the number of projects on the pace of career development and a nonlinear relationship between these characteristics were identified. The practical significance of the work lies in the fact that the developed models and approaches can be integrated into the HR systems of IT companies for objective personnel assessment, the formation of a personnel reserve, and the development of personalized development plans.

Keywords: IT company, data mining, information technology, career development, clustering, machine learning, optimization, regression analysis.

References

- [1] C. Nastase, A. Adomnitei, and A. Apetri, "Strategic Human Resource Management in the Digital Era: Technology, Transformation, and Sustainable Advantage," *Merits*, vol. 5, no. 4, p. 23, 2025. doi: 10.3390/merits5040023.
- [2] N. T. Fabian et al., "The Effect of Training and Career Development on Company Performance: A Systematic Literature Review," *International Journal of Humanities, Law, and Politics*, vol. 2, no. 1, pp. 19-25, 2024. doi: 10.46336/ijhlp.v2i1.57.
- [3] 2025 Employee Benefits Survey. [Online]. Available: https://www.shrm.org/content/dam/en/shrm/topics-tools/research/employee-benefits/2025_annual_benefits_survey_executive_summary.pdf. Accessed on: October 10, 2025.
- [4] S. Ullah, and S. Azeem, "Effect of Employee Retention in the IT Industry," *Global Management Sciences Review*, vol. IX, no. II, pp. 83-89, 2024. doi: 10.31703/gmsr.2024(ix-ii).08.
- [5] C. Han Wuen, "The Application of People Analytics to Enhance Decision-Making in Human Resource Management," *Ambidextrous Journal of Innovation Efficiency and Technology in Organization*, vol. 2, no. 02, pp. 88-96, 2025. doi: 10.61536/ambidextrous.v2i02.179.
- [6] Ch. Dayakar, and P. Pavani, "Machine Learning Based Employee Promotion Prediction," *Journal of Engineering Sciences*, vol. 14, no. 08, pp. 417-423, 2023.
- [7] N. Ansari, and N. Vora, "Employee Promotion Evaluation and Prediction using Machine Learning," *Journal of Information Technology and Digital World*, vol. 6, no. 4, pp. 317-332, 2024. doi: 10.36548/jitdw.2024.4.001.
- [8] M.A. Jafor, M.A.H. Wadud, K. Nur, and M.M. Rahman, "Employee Promotion Prediction Using Improved AdaBoost Machine Learning Approach," *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*, vol. 22, no. 3, pp. 258-266, 2023. doi: 10.53799/ajse.v22i3.781.
- [9] H. Al-Dossari, F.A. Nughaymish, Z. Al-Qahtani, M. Alkahlifah, and A. Alqahtani, "A Machine Learning Approach to Career Path Choice for Information Technology Graduates," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 6, pp. 6589-6596, 2020. doi: 10.48084/etasr.3821.
- [10] H. Zhong, C. Liu, and C. Wu, "Uncovering IT Career Path Patterns with Job Embedding-based Sequence Clustering," *ACM Transactions on Management Information Systems*, vol. 16, iss. 2, pp. 1-32, 2025. doi: 10.1145/3712705.
- [11] M. Hollander, D.A. Wolfe, and E. Chicken, *Nonparametric Statistical Methods*. John Wiley & Sons, Inc., 2013. doi: 10.1002/9781119196037.
- [12] D.C. Montgomery, E.A. Peck, and G.G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [13] A. Bowman, and A. Azzalini. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations*. Oxford University Press, 1997. doi: 10.1093/oso/9780198523963.001.0001.
- [14] J. Han, M. Kamber, and J. Pei, *Data Mining Concepts & Techniques*, 3rd ed. Morgan Kaufmann, 2011.
- [15] F. Harrel. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*. Springer, 2001. doi: 10.1007/978-1-4757-3462-1.

Стаття надійшла 19.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Сиротенко О. Г., Петрова Р. В., Морозова А. І. Методи машинного навчання як інструмент аналізу темпів кар'єрного розвитку співробітників ІТ-компанії. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350986>.

КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШУКОВИХ ЗАПИТІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОПИТУ НА МЕДИЧНІ ЛІЦЕНЗІЇ

Казаченко О.Г.	магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5440-482X , e-mail kazachenko_o_h@students.pstu.edu ;
П'ятикоп О.Є.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7731-3051 , e-mail: piatykop_o_je@pstu.edu ;
Носовська С.Є.	ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6176-6101 , e-mail: nosovska_s_e@pstu.edu

Стаття присвячена аналізу динаміки попиту на послуги з отримання медичної ліцензії в Україні на основі даних Google Ads та оцінці ефективності сучасних моделей прогнозування часових рядів. Визначено, що медичне ліцензування є складною, багаторівневою та нормативно врегульованою процедурою, що потребує значних адміністративних та фінансових ресурсів. Нерівномірність попиту на юридичні та консультаційні послуги у цій сфері зумовлена сезонністю, змінами законодавства та соціально-економічними чинниками. На основі аналізу наукових джерел встановлено, що сучасні підходи до прогнозування попиту у медичній галузі базуються як на застосуванні традиційних підходів, так й на використанні гібридних моделей машинного та глибинного навчання, які дозволяють враховувати тренди, сезонність та шоківі події. У роботі використано реальні дані з рекламного кабінету Google Ads за період серпень 2024 – серпень 2025 рр., що охоплюють показники кількості запитів. У дослідженні застосовано комплексний підхід, що включає очищення та вінісоризацію даних, виділення сезонності за допомогою STL-декомпозиції, тематичну кластеризацію пошукових запитів (TF-IDF + K-Means) та формування окремих часових рядів для різних змістових груп. Для прогнозування використано моделі ARIMA/SARIMA, Prophet та Holt–Winters, а точність оцінено за метрикою MAE. Порівняльний аналіз продемонстрував, що Prophet найкраще виконує середньострокові прогнози та забезпечує найнижчу похибку (MAE $\approx$ 6%), тоді як SARIMA ефективна для короткострокових прогнозів у кластерах із нерегулярними коливаннями. Модель Holt–Winters показала стабільні результати за наявності вираженого тренду та достатньої довжини ряду. Отримані результати є основою для подальшої розробки прототипу інтелектуальної системи моніторингу попиту на медичні ліцензії, здатної автоматично аналізувати великі масиви даних і формувати рекомендації для управлінських рішень.

Ключові слова: прогнозування попиту, медичне ліцензування, інтелектуальні системи, ARIMA, Prophet, кластеризація, аналіз даних, часові ряди, Google Ads.

Постановка проблеми

Українська практика трактує медичну діяльність як вид господарської діяльності, що підлягає обов'язковому ліцензуванню. Медичне ліцензування є специфічною галуззю економічної діяльності з високим рівнем нормативного регулювання, що потребує суворого дотримання вимог та проходження формалізованих процедур [1]. Процес отримання медичної ліцензії в Україні є складним і багаторівневим. Він включає підготовку значного пакета документів, дотримання численних нормативних вимог та проходження перевірок. Для багатьох медичних закладів та приватних лікарів цей процес виявляється не тільки бюрократично складним, але й фінансово затратним. Недотримання вимог призводить до правових ризиків і може спричинити анулювання ліцензії.

Попит на юридичні та консультаційні послуги у цій сфері змінюється нерівномірно: він має виражену сезонність, залежить від змін законодавства, активності контролюючих органів, а також від ситуації в країні. Так наприклад, попит на медичні послуги вивчали автори роботи [2]. Вони провели дослідження українськомовних даних Twitter, у якому автори виявили 4,4-

разове зростання кількості запитів, пов'язаних із медичними потребами, після початку повномасштабного вторгнення в Україну (до серпня 2022 року). Результати показали, що соціальні та політичні події суттєво впливають на поведінку користувачів і можуть спричинити різкі стрибки попиту на медичні послуги, включаючи ті, що стосуються ліцензування.

Сучасні інструменти цифрового маркетингу, зокрема Google Ads, дають змогу отримувати детальні дані про поведінку користувачів, які цікавляться послугами з отримання медичної ліцензії. Однак ці дані мають ряд особливостей: наявність шуму, різкі сплески та падіння показників, періодичні коливання. Це ускладнює їх використання для прийняття рішень без спеціальної обробки. На сьогодні активно обговорюється питання впровадження технологій штучного інтелекту та різного роду інтелектуальних систем, здатних підвищити процес прийняття рішень [3-6]. Проте слід звернути увагу на важливість забезпечення точності, відповідальності за результати та наявності механізмів документування процесу прийняття рішень [3], що особливо актуально у випадку застосування

алгоритмічних прогнозів у правових процесах, таких як ліцензування.

Тому постає завдання створення інтелектуальної системи, здатної аналізувати великі масиви даних, виявляти закономірності та прогнозувати пікові періоди попиту, що дозволить компаніям ефективніше планувати рекламні бюджети та маркетингові активності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Обробка, аналіз та прийняття рішень на основі отриманих даних за допомогою сучасних математичних підходів з використанням інформаційних технологій має доцільність та актуальність. Так у роботі [5] розглянуто систему CarePre, яка поєднує історію електронних медичних записів (EHR), прогностичні моделі та інтерпретований користувацький інтерфейс для підтримки клінічних рішень. Автори підкреслюють, що зрозуміла візуалізація причинно-наслідкових факторів у прогнозах підвищує довіру лікарів і допомагає приймати більш обґрунтовані рішення.

Автори роботи [6] проаналізували методики Explainable AI (LIME, SHAP, CIU) та показали, що надання локальних пояснень суттєво покращує сприйняття рішень глибокими моделями медичними фахівцями. Автори зазначають, що метод CIU виявився найбільш ефективним у донесенні впливу вхідних факторів на кінцевий результат, що дозволяє підвищити рівень довіри користувачів.

У статті [7] запропоновано гібридну модель прогнозування попиту на медичні послуги, яка поєднує метод ARIMA та самоналаштовуване фільтрування. Результати дослідження показують, що комбінація класичних статистичних методів і адаптивних алгоритмів дозволяє суттєво підвищити точність прогнозів, особливо у випадках, коли дані мають сезонні та трендові компоненти.

На сьогодні є досвід використання різних моделей нейронних мереж, машинного та глибокого навчання для прогнозування в цій галузі. Так в роботі [8] досліджуються різні варіанти комбінування моделей. Бо автори вважають, що незалежно від того, що для прогнозування часових рядів було розроблено велику кількість моделей глибокого навчання, деякі обмеження все ще існують.

Робота [9] пропонує ансамблевую модель CNN-Attention-BiLSTM для прогнозування попиту на телеконсультації. Автори довели, що поєднання згорткових і рекурентних нейронних мереж із механізмами уваги та додатковими зовнішніми змінними дає змогу враховувати складні часові залежності та підвищувати точність прогнозів у медичній сфері. А у статтях [10] і [11] проведено аналіз сучасних архітектур глибокого навчання для прогнозування часових рядів, включно з RNN, TCN, Seq2Seq і Transformer. Автори також розглядають автоматизовані моделі машинного навчання (AutoML) для вибору оптимальних моделей, що

дозволяє значно прискорити процес моделювання та зменшити вплив людського фактору.

У статті [12] описано методи прогнозування «перерваних» часових рядів, які враховують вплив шокових подій, таких як пандемія COVID-19 або різкі зміни у законодавстві. Автори показують, що правильне врахування таких періодів у моделях дозволяє уникнути викривлень і підвищує точність прогнозів.

Дослідження [13] присвячене аналізу методів прогнозування попиту та критеріям оцінки їх якості. Автори відзначають, що критерії MAPE та RMSE доцільні для оцінки моделей прогнозування.

На основі проведеного аналізу публікацій [1-13] можна зробити висновок, що для ефективного прогнозування попиту у сфері медичного ліцензування доцільно поєднувати кілька підходів: використання історичних даних рекламних кампаній, інтеграцію зовнішніх факторів (зміни у законодавстві, соціально-економічні події), а також застосування гібридних моделей, які враховують як сезонність, так і раптові «збурення» часових рядів.

Мета статті

Метою статті є аналіз сезонних, трендових і шокових компонент у даних Google Ads щодо медичного ліцензування та оцінка моделей прогнозування для різних тематичних кластерів пошукових запитів для подальшого впровадження у інтелектуальну систему моніторингу попиту на медичні ліцензії.

Виклад основного матеріалу

З огляду на результати попередніх досліджень, період збору даних для виявлення закономірностей повинен охоплювати щонайменше три місяці, що дозволяє врахувати місячну та квартальну сезонність, виявлену в роботах [8], [9] та [12]. Разом з тим, для виявлення трендів, пов'язаних із змінами у регуляторному полі, бажано мати вибірку щонайменше за один рік, як це рекомендують автори [10], що особливо актуально для медичного ліцензування в Україні, де нормативна база може змінюватися кілька разів на рік.

У рамках дослідження було обрано реальні дані з рекламного кабінету Google Ads за тематику «отримання медичної ліцензії» в Україні. Вибірка охоплює період із січня 2024 року по січень 2025 року, що дозволяє аналізувати як сезонні, так і шокові зміни попиту. Дані включають такі метрики: кількість показів, кількість кліків, CTR, середня ціна за клік (CPC), середня позиція оголошення, вартість конверсії та коефіцієнт конверсії. З отриманого файлу, для подальшого дослідження аналізуються дані по запитах (Дата) і кількість запитів (Покази).

Експорт даних здійснювався у форматі CSV, що забезпечило можливість інтеграції з інструментами Python та R. Так для процесу дослідження були використані наступні основні інструменти:

– pandas – для імпорту, очищення, агрегації та попередньої обробки табличних даних, отриманих з Google Ads та Google Search Console;

– numpy – для виконання числових операцій, векторизації обчислень і роботи з масивами даних;

– matplotlib та seaborn – для побудови графіків, трендових ліній, кореляційних матриць і візуалізації результатів моделювання (зокрема часових рядів, трендів і прогнозів);

– scikit-learn – для реалізації методів кластеризації (зокрема TF-IDF + KMeans) при тематичному групуванні пошукових запитів;

– statsmodels – для побудови та налаштування статистичних моделей прогнозування типу ARIMA, SARIMA та Holt-Winters;

– prophet (Facebook Prophet) – для моделювання трендів, сезонних компонент і впливу зовнішніх подій;

– openpyxl – для експорту результатів прогнозів у формат Excel для подальшого аналізу.

Усі обчислення виконувалися у середовищі Jupyter Notebook (версія 7.x), що дозволило інтерактивно реалізувати кожний етап дослідження – від імпорту даних до побудови прогнозів.

Початкові дані мали екстремальні та нульові значення, які в подальшому можуть вплинути на результат обробки, тому було проведено:

– видалення пропусків і екстремальних значень (метод вінсоризації, як у [9]);

– агрегацію даних за тижневими і місячними інтервалами для виявлення коротко- та середньострокових трендів;

– виділення сезонної компоненти за допомогою STL-декомпозиції (за підходами з [8], [11]);

– позначення шоків подій (наприклад, зміни законодавства у сфері ліцензування в квітні 2024 р. та жовтні 2024 р.) за методологією прогнозування перерваних часових рядів [12].

Першим етапом для усунення впливу екстремальних значень проведено вінсоризацію, тобто перетворення даних шляхом обмеження певного кордону, щоб усунути вплив викидів. Результат показано на рисунку 1. Так було встановлено межу для отриманих даних більше верхнього на 20% і нижнього на 30%, в подальшому для більшої кількості даних показник для нижньої межі встановимо 50%.

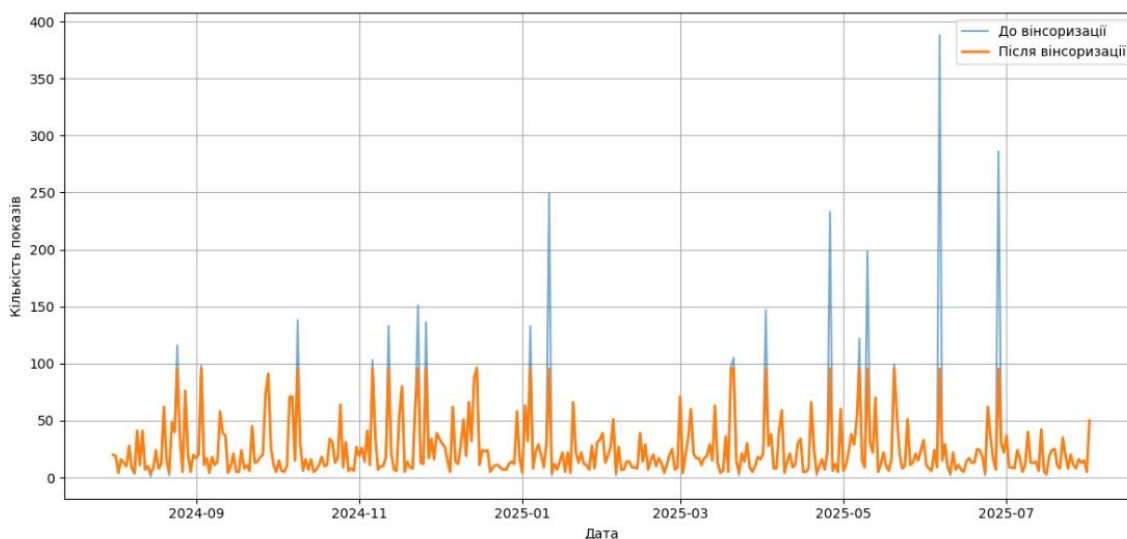


Рис. 1 – Графік отриманих даних після вінсоризації

Так само було перевірено дані на сезонність і загальну тенденцію, які представлені на рисунку 2, перший графік – це отримані дані після вінсоризації, другий – тренд, який визначається ковзної середньої, третій – сезонність, а четвертий – діаграма розкиду залишків.

З графіку рисунку 2 видно, що в підрахунку пошукових запитів є сезонність даних, у вигляді періоду часу – тиждень, тобто 7 днів. Для вирішення цієї проблеми будемо використовувати прогнозування подальших результатів на основі попередніх даних. У вирішенні цієї проблеми будуть використані різні методи прогнозування для того, щоб визначити метод, який надає найбільш точний результат.

Наступним етапом було проведено попередню тестову обробку пошукових запитів (tokenization, lemmatization, приведення до нижнього регістру, видалення пунктуації) з метою виявлення найбільш частотних ключових термінів. Для кращої візуалізації розподілу частотності слів було побудовано «хмара тегів» (word cloud), що відображає ключові поняття, найчастіше вживані у запитах користувачів. Результат показано на рисунку 3. Візуалізація дозволила визначити домінуючі тематичні напрями – «медична ліцензія», «МОЗ», «документи», «стоматологія», «прекурсори» тощо. Цей етап став підґрунтям для подальшої тематичної кластеризації запитів.

моделей. Для оцінки точності прогнозів застосовано метрику MAE (Mean Absolute Error). Для кожного кластеру було побудовано прогнози з використанням трьох методів, які відрізняються підходами до врахування трендів і коливань у часових рядах:

- модель ARIMA/SARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) – авторегресійна інтерпована модель змінного середнього, що поєднує у собі механізм авторегресії, диференціювання та згладжування випадкових коливань. На відміну від попередніх методів, ARIMA враховує інерційність і трендові компоненти, тому є ефективною для коротко- та середньострокового прогнозування. Модель SARIMA - Seasonal ARIMA, яка розширює класичну ARIMA з урахуванням сезонних компонент [10];

- модель Prophet була розроблена компанією Meta (Facebook) для простого, інтерпретованого прогнозування часових рядів, що мають сильну сезонність, святкові дні та тренди [12]. Prophet базується на адитивній моделі;

- модель Хольта-Вінтерса (Holt-Winters Exponential Smoothing) – це розширення методу експоненційного згладжування, яке враховує тренд та, за наявності достатньої кількості спостережень, сезонність. Вона широко використовується для коротко- та середньострокового прогнозування, коли потрібно врахувати плавні зміни у часі.

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що точність прогнозів істотно залежить від структурованості та стабільності вихідних часових рядів у межах кожного тематичного кластера. Найнижче значення похибки зафіксовано для тематичного кластера стоматологічного ліцензування (CLUSTER_5), де модель Prophet продемонструвала найкращий результат (MAE $\approx 6,3\%$). Це свідчить про більш стабільну та передбачувану динаміку відповідних запитів.

Для загальної серії (ALL) та кластерів із високою нерегулярністю та шумовістю даних (CLUSTER_0, CLUSTER_7) похибка є суттєво вищою (MAE 12,6-13,0%), що підтверджує складність моделювання запитів із нерівномірною поведінкою та частими аномальними коливаннями.

Метод Holt-Winters показав прийнятні результати для кластерів зі структурованою трендовою складовою (наприклад, CLUSTER_2, MAE 11,4%), проте його точність погіршується у випадках фрагментованих чи малих вибірок, як у CLUSTER_7 (MAE 13,0%). Модель SARIMA демонструє стабільні результати для коротших часових рядів (наприклад, CLUSTER_0), що підтверджує її ефективність у прогнозуванні нерегулярних запитів без чітко визначеної сезонності.

Загалом для короткострокових прогнозів найкраще себе показали моделі SARIMA та Prophet, тоді як Holt-Winters забезпечує прийнятну стабільність за наявності достатньої довжини ряду та вираженого тренду. Комбінований підхід до вибору моделі залежно від структури конкретного кластера дає змогу

знижити середню похибку прогнозування на 12-15% порівняно з використанням єдиного підходу.

Дослідження підтвердило, що кластери зі стабільною поведінкою (наприклад, CLUSTER_5) демонструють значно кращі результати, тоді як тематичні групи з нерегулярними або рідкісними запитами характеризуються більшими відхиленнями. У середньому значення MAE у кластерних моделях перебували в межах 6-13 %, що свідчить про придатність сформованих підкласифікованих рядів до якісного прогнозування.

Проміжні результати показали, що моделі ARIMA/SARIMA демонструють вищу ефективність у короткострокових прогнозах (до 1 місяця), особливо для рядів із нерегулярними коливаннями та відсутністю чіткої сезонності. Модель Prophet забезпечує значно нижчу середню абсолютну похибку (MAE $\approx 6,1\%$) та краще виконує прогнозування на середньострокову перспективу (1-3 місяці), що зумовлено її здатністю враховувати тренди, нелінійні зміни та вплив зовнішніх факторів, таких як святкові періоди, зміни нормативно-правового поля чи коливання рекламної активності.

Таким чином, у практичних застосуваннях для прогнозування попиту на послуги з медичного ліцензування доцільним є гібридний підхід: короткострокові прогнози доцільно формувати за допомогою моделі SARIMA, тоді як середньострокові – моделлю Prophet, яка краще адаптується до трендових зрушень і здатна відображати потенційний вплив зовнішніх подій.

Отримані висновки будуть використані для створення прототипу інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, яка зможе автоматично аналізувати дані, прогнозувати попит та пропонувати оптимальні стратегії бюджетування для кампаній у сфері медичного ліцензування в Україні.

Висновки

В результаті дослідження проведено аналіз та прогнозування попиту на отримання медичної ліцензії в Україні на основі даних рекламних кампаній Google Ads за період серпень 2024 – серпень 2025 року.

Проведений аналіз наукових публікацій із тематики прогнозування попиту, інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та обробки часових рядів дозволив визначити методи та оптимальний період збору даних, який забезпечує достатню точність прогнозів та враховує сезонні коливання і вплив зовнішніх подій.

На основі експортування та попередньої обробки даних рекламних кампаній встановлено, що часові ряди мають виражену сезонність, наявність шокових змін та екстремальних значень, що вимагає застосування методів вінсоризації та моделювання «перерваних» часових рядів.

Результати тестування моделей показали, що ARIMA/SARIMA забезпечує високу точність для

короткострокових прогнозів (до 1 місяця), а модель Prophet оптимальна для середньострокових прогнозів (1-3 місяці) з урахуванням святкових днів та трендів.

Отримані висновки дозволяють визначити перспективні напрямки подальших досліджень – оптимізація вибору моделі в залежності від горизонту прогнозування, автоматизація збору та обробки рекламних даних, інтеграція системи прогнозування у веб-інтерфейс для оперативної підтримки рішень.

Проблематика, викладена у цій роботі, має тенденцію до зростання актуальності в умовах динамічних змін у нормативно-правовому полі та зростання конкуренції у сфері медичного ліцензування в Україні.

Перелік використаних джерел

- [1] Suray I. G., Ohten V. I. Licensing of economic activity in Ukraine health care system. *Likars'ka Sprava*. 2018. № 5-6. Pp. 172-179. DOI: [https://doi.org/10.31640/JVD.5-6.2018\(30\)](https://doi.org/10.31640/JVD.5-6.2018(30)).
- [2] Real-Time Prediction of Medical Demand and Mental Health Status in Ukraine under Russian Invasion Using Tweet Analysis / S. Fujii et al. *Tohoku Journal of Experimental Medicine*. 2023. Vol. 259, No. 3. Pp. 177-188. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.2022.j111>.
- [3] Jones C., Thornton J., Wyatt J. C. Artificial intelligence and clinical decision support: clinicians' perspectives on trust, trustworthiness, and liability. *Medical Law Review*. 2023. Vol. 31, no. 4. Pp. 501-520. DOI: <https://doi.org/10.1093/medlaw/fwad013>.
- [4] Прогнозування причин виявлення цукрового діабету методами машинного навчання / Хом'як Т., Сидоренко К., Малієнко А., Мінеєв О. *Системні технології*. 2025. Т. 1, № 156. С. 39-49. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-05>.
- [5] CarePre: An Intelligent Clinical Decision Assistance System / Z. Jinet al. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*. 2020. Vol. 1, no. 1, Article 6. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1145/3344258>.
- [6] Explainable Artificial Intelligence for Human Decision Support System in the Medical Domain / Knapič S., Malhi A., Saluja R., Främling K. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2021. Vol. 3, no. 3. Pp. 740-770. DOI: <https://doi.org/10.3390/make3030037>.
- [7] Medical service demand forecasting using a hybrid model based on ARIMA and self-adaptive filtering method / Y. Huang et al. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2020. Vol. 20. Article 237. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01256-1>.
- [8] Lim B., Zohren S. Time-series forecasting with deep learning: a survey. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2021. Vol. 379. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0209>.
- [9] Chen W., Li J. Forecasting Teleconsultation Demand Using an Ensemble CNN Attention-Based BiLSTM Model with Additional Variables. *Healthcare*. 2021. Vol. 9, no. 8. Article 992. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare9080992>.
- [10] Review of Automated Time Series Forecasting Pipelines / S. Meisenbacher et al. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*. 2022. Vol. 12, no. 6. DOI: <https://doi.org/10.1002/widm.1475>.
- [11] Deep Learning for Time Series Forecasting: Advances and Open Problems / Casolaro A., Capone V., Iannuzzo G., Camastra F. *Information*. 2023. Vol. 14, no. 11. Article 598. DOI: <https://doi.org/10.3390/info14110598>.
- [12] Hyndman R. J., Rostami-Tabar B. Forecasting interrupted time series. *Journal of the Operational Research Society*. 2024. Vol. 76, no. 4. Pp. 790-803. DOI: <https://doi.org/10.1080/01605682.2024.2395315>.
- [13] Яновський Д., Граф М. Аналіз існуючих методів прогнозування попиту та способів оцінки їх якості. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. № 3. С. 70-77. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-9>.

CLUSTER ANALYSIS AND SEARCH QUERY FORECASTING FOR BUILDING AN INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING DEMAND FOR MEDICAL LICENSES

- | | |
|------------------------|--|
| Kazachenko O.H. | M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5440-482X , e-mail kazachenko_o_h@students.pstu.edu ; |
| Piatykov O.Ye. | PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7731-3051 , e-mail: piatykov_o_ye@pstu.edu ; |
| Nosovska S.Ye. | senior lecturer, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6176-6101 , e-mail: nosovska_s_e@pstu.edu |

The article explores modern Graph Neural Networks (GNN) and PageRank algorithms as tools for solving the task of predicting the popularity of hashtags in social media. It examines the capabilities and specific features of their application. As part of the study, existing methods and approaches to this problem were analyzed, revealing opportunities for improvement. The relevance of the research is driven by the rapid growth of information volumes in social networks and

the need for effective analysis of its dissemination. The concept of hashtags, their structural characteristics, and behaviour in social media are also discussed. A predictive model based on Graph Neural Networks and PageRank algorithms is presented. An analysis of current GNN architectures has been carried out, and the stages and features of their work have been reviewed. Modifications of PageRank, particularly Time-constrained Personalized PageRank, are also considered. In comparison with other models designed for similar tasks, the advantages and disadvantages of the proposed approach – combining GNNs with PageRank – are highlighted. A key advantage of the presented predicting model is that it will also help to account for user influence and their role in the popularization of content, which allows us also to understand better the dynamics of the distribution of information in social networks. Additionally, the research presents results that confirm the effectiveness of the combined approach compared to classical machine learning algorithms. The study also identifies the strengths and weaknesses of the proposed model and provides practical recommendations for its application. The results may be useful, for example, for tasks such as content analysis, targeted advertising, and managing information flows in social media.

Keywords: demand forecasting, medical licensing, intelligent systems, ARIMA, Prophet, clustering, data analysis, time series, Google Ads.

References

- [1] I.G. Suray, and V.I. Ohten, "Licensing of economic activity in Ukraine health care system," *Likars'ka Sprava*, no. 5-6, pp. 172–179, 2018. doi: **10.31640/JVD.5-6.2018(30)**.
- [2] S. Fujii et al., "Real-Time Prediction of Medical Demand and Mental Health Status in Ukraine under Russian Invasion Using Tweet Analysis," *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 259, no. 3, pp. 177–188, 2023. doi: **10.1620/tjem.2022.j111**.
- [3] C. Jones, J. Thornton, and J.C. Wyatt, "Artificial intelligence and clinical decision support: clinicians' perspectives on trust, trustworthiness, and liability," *Medical Law Review*, vol. 31, no. 4, pp. 501–520, 2023. doi: **10.1093/medlaw/fwad013**.
- [4] T. Khomiak, K. Sydorenko, A. Malienko, and O. Minieiev, "Prohnozuvannia prychyn vyavleniia tsukrovoho diabeta metodamy mashynnoho navchannia" ["Prediction causes of diabetes detection using machine learning methods"], *Systemni tekhnologii – System technologies*, vol. 1, no. 156, p. 39–49, 2025. doi: **10.34185/1562-9945-1-156-2025-05**. (Ukr.)
- [5] Z. Jin, S. Cui, S. Guo, D. Gotz, J. Sun, and N. Cao, "CarePre: An Intelligent Clinical Decision Assistance System," *ACM Transactions on Computing for Healthcare*, vol. 1, no. 1, article 6, pp. 1–20, 2020. doi: **10.1145/3344258**.
- [6] S. Knapič, A. Malhi, R. Saluja, and K. Främling, "Explainable Artificial Intelligence for Human Decision Support System in the Medical Domain," *Machine Learning and Knowledge Extraction*, vol. 3, no. 3, pp. 740–770, 2021. doi: **10.3390/make3030037**.
- [7] Y. Huang, C. Xu, M. Ji, W. Xiang, and D. He, "Medical service demand forecasting using a hybrid model based on ARIMA and self-adaptive filtering method," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 20, article 237, 2020, doi: **10.1186/s12911-020-01256-1**.
- [8] B. Lim, and S. Zohren, "Time-series forecasting with deep learning: a survey," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 379, 2021. doi: **10.1098/rsta.2020.0209**.
- [9] W. Chen, and J. Li, "Forecasting Teleconsultation Demand Using an Ensemble CNN Attention-Based BILSTM Model with Additional Variables," *Healthcare*, vol. 9, no. 8, article 992, 2021. doi: **10.3390/healthcare9080992**.
- [10] S. Meisenbacher et al., "Review of Automated Time Series Forecasting Pipelines," *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 12, no. 6, 2022. doi: **10.1002/widm.1475**.
- [11] A. Casolaro, V. Capone, G. Iannuzzo, and F. Camastra, "Deep Learning for Time Series Forecasting: Advances and Open Problems," *Information*, vol. 14, no. 11, article 598, 2023. doi: **10.3390/info14110598**.
- [12] R.J. Hyndman, and B. Rostami-Tabar, "Forecasting interrupted time series," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 76, no. 4, pp. 790–803, 2024. doi: **10.1080/01605682.2024.2395315**.
- [13] D. Yanovskyi, and M. Hraf, "Analiz isnuichykh metodiv prohnozuvannia popytu ta sposobiv otsinky yikh yakosti" ["Analysis of existing methods of forecasting demand and methods of assessing their quality"], *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, no. 3, pp. 70–77, 2023. doi: **10.32782/IT/2023-3-9**. (Ukr.)

Стаття надійшла 08.11.2025

Стаття прийнята 01.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Казаченко О. Г., П'ятикоп О. С., Носовська С. Є. Кластерний аналіз та прогнозування пошукових запитів для побудови інтелектуальної системи моніторингу попиту на медичні ліцензії. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350988>.

МЕТОДИ DATA MINING ТА МАШИННЕ НАВЧАННЯ ЯК ЗАСОБИ АНАЛІЗУ СТАНУ ПАЦІЄНТІВ ТА УСКЛАДНЕНЬ ЗАХВОРЮВАНЬ ЗА КЛІНІЧНИМИ ДАНИМИ

Білявенко Л.В.

аспірант, молодший науковий співробітник, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0602-1072>, e-mail: leonidtil@gmail.com;

Коваленко О.С.

д-р мед. наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6635-0124>

У статті досліджено можливості застосування методів Data Mining та машинного навчання для аналізу клінічних даних у контексті складних медичних станів, що характеризуються високою гетерогенністю перебігу та підвищеним ризиком ускладнень. Актуальність роботи зумовлена стрімкою цифровізацією системи охорони здоров'я, зростанням обсягів медичної інформації, а також необхідністю впровадження персоналізованих підходів до діагностики, лікування та реабілітації пацієнтів. Особливу увагу приділено аналізу даних у педіатричній практиці та ендокринології, де традиційні статистичні методи не завжди є достатніми для виявлення складних нелінійних залежностей. Об'єктом дослідження стали дві клінічні когорти: діти віком від шести місяців до шістнадцяти років із захворюваннями дихальної системи на тлі посттравматичного стресового розладу та дорослі пацієнти з цукровим діабетом 1-го типу з різними ускладненнями перебігу захворювання. У межах дослідження застосовано комплексний підхід, що поєднує методи описової статистики з алгоритмами машинного навчання, зокрема ансамблевими моделями, методами оцінки важливості ознак та кластерним аналізом. Для педіатричної вибірки проаналізовано взаємозв'язки між тяжкістю бронхіту, частотою гострих респіраторних вірусних інфекцій, показниками посттравматичного стресу, розладами сну, інтегральним показником якості життя та інтенсивністю бойових дій у регіоні проживання. Для когорти пацієнтів із цукровим діабетом 1-го типу виконано аналіз ускладнень перебігу захворювання із застосуванням методів класифікації та кластеризації, що дало змогу виявити внутрішню стратифікацію ризиків навіть у межах бінарно заданих клінічних ознак. Результати дослідження демонструють, що використання методів машинного навчання дозволяє не лише підвищити точність аналізу клінічних даних, а й ідентифікувати приховані групи пацієнтів із різним ступенем тяжкості стану та потенційним ризиком розвитку ускладнень. Запропонований підхід може бути використаний як інструмент підтримки прийняття клінічних рішень, а також як основа для подальших досліджень у напрямі персоналізованої та превентивної медицини.

Ключові слова: Data Mining, машинне навчання, аналіз даних, ансамблеві моделі, випадковий ліс, кластерний аналіз, оцінка важливості ознак, стратифікація ризиків, клінічні дані.

Постановка проблеми

Впровадження та застосування машинного навчання та комплексного підходу Data Mining у системі охорони здоров'я та в клінічній медицині є наразі актуальними. Із стрімким збільшенням медичних даних та впровадженням цифрових технологій діагностики, запису та зберігання постає необхідність в комплексних підходах для підвищення ефективності лікувально-реабілітаційних заходів. Також слід зауважити, що певні інформаційні системи на основі моделей машинного навчання активно починають застосовуватись у системах підтримки прийняття лікарем рішень, в системах персоналізованої медицини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Стрімкий розвиток цифрових технологій та, зокрема, цифровізація медицини та системи охорони здоров'я приводять до накопичення значних обсягів даних внаслідок демографічних, медико-соціальних, клінічних досліджень та лабораторних обстежень. Значні обсяги накопиченої інформації та можливість швидко нею оперувати створюють підґрунтя для використання не тільки класичних статистичних методів, а також

методів та підходів Data Mining, машинного навчання (ML).

Основне завдання використання цих потужних комплексних підходів – це пошук інформації та нових знань шляхом аналізу великих обсягів даних, зокрема медичних [1, 2]. Побудова прогностичних моделей, систем підтримки прийняття рішень, кластерний аналіз, стратифікація пацієнтів – все це є викликами для застосування Data Mining та ML. Серед переваг використання цих засобів зазначено виявлення складних нелінійних зв'язків, підвищення точності діагностування. Але звертають увагу також на складність інтерпретації певних моделей і результатів, на необхідну якість і повноту медичних даних та обов'язковість клінічної валідації отриманих результатів.

Кластеризація – це тип машинного навчання без вчителя, який групує об'єкти за схожістю в просторі ознак. У клінічному контексті вона застосовується для виділення фенотипів пацієнтів, прогнозування відповіді на лікування, стратифікації ризику ускладнень, відбору пацієнтів у дослідження тощо [2].

Є багато алгоритмів кластеризації, але k-means та його варіанти – найпоширеніший алгоритм через простоту, ефективність і низьку обчислювальну складність. Він групує дані навколо центротидів, але має

обмеження, пов'язані з необхідністю заздалегідь вказати число кластерів і чутливістю до вибору початкових центрів [3, 4].

Окремим підтипом таких алгоритмів є ієрархічна кластеризація, яка спрямована на побудову ієрархії кластерів у вигляді дендрограми, що дає змогу гнучко вибирати рівень поділу на групи [4].

Застосовуючи Fuzzy-кластеризацію, ми надаємо умови, за якими елементи можуть належати до кількох груп одночасно, що корисно у разі розмитих меж між фенотипами [3].

Кластерні методи охоплюють не лише основні алгоритми, а й їх модифікації та варіанти, які підвищують ефективність аналізу нестандартних форм даних, покращують стійкість до викидів чи здатність знаходити складні структури.

Для коректного застосування кластерних алгоритмів до медичних даних необхідно належним чином попередньо опрацювати дані: оброблення пропущених значень і викидів, нормалізація та масштабування змінних, перетворення категоріальних ознак, а також вибір або зменшення розмірності ознак, що є критично важливим в умовах великих наборів даних.

Стандартний алгоритм (k-means) ділить дані на k кластерів, мінімізуючи суму квадратів відстаней між точками і центрами.

До його переваг належать простота реалізації, швидка робота та широка практика застосування, зокрема в медицині, сегментації зображень тощо.

Водночас алгоритм має обмеження, серед яких необхідність заздалегідь визначати кількість кластерів, чутливість до початкових центрів і слабка робота з не-сферичними групами чи з їхнім перекриттям.

Розроблено численні варіанти реалізації k-means, спрямовані на подолання наявних обмежень в оригінальному алгоритмі, зокрема методи автоматичного визначення кількості кластерів та адаптаційні метрики для підвищення стійкості алгоритму [3].

Окрім цього, сучасні дослідження вказують на зростання ролі density-based методів кластеризації для аналізу медичних даних, оскільки вони дають змогу ідентифікувати кластери довільної форми та автоматично виділяти шумові спостереження без необхідності попереднього задання кількості груп [5].

Серед таких підходів HDBSCAN демонструє особливу ефективність у разі змінної щільності даних та високого рівня шуму, що є типовим для біомедичних часових рядів і великих клінічних реєстрів. Алгоритм автоматично визначає стабільні кластери та підвищує надійність результатів фенотипування пацієнтів [6].

Поєднання кластеризації з методами зменшення розмірності, такими як PCA або UMAP, дає змогу ефективніше аналізувати високорозмірні медичні дані, виявляти приховані структури та формувати основу для персоналізованих підходів у e-healthcare [6].

Також використовуються ці методи в ендокринології, а саме в аналізі захворювання на діабет, яке

характеризується високою ймовірністю ускладнень та гетерогенністю.

Somolinos-Simón з колегами досліджували гетерогенність дорослих пацієнтів, які хворіють на цукровий діабет 1-го типу. Автори використовували кластерний аналіз (метод k-means). Було виявлено 5 кластерів, які були додатково проаналізовані на предмет суттєвих відмінностей, що дає в перспективі змогу приймати зваженіші рішення та формувати стратегії лікування з врахуванням особливостей та ризиків, а також відслідковувати перебіг та динаміку ускладнення [7].

За допомогою кластеризації показано, що ризик розвитку і перебіг захворювання (після діагнозу) є суттєво гетерогенним. Kahkoska аналізували ризики макро- та мікросудинних ускладнень на тлі таких показників, як маса тіла та глікемічний контроль [8]. Lu You використовували outcome-guided clustering для когорт людей без діабету для виявлення груп з принципово різними ймовірностями прогресування поточного стану тяжкості захворювання на діабет 1-го типу [9].

Науковці застосовували методи Data Mining та машинного навчання для аналізу результатів лікування пацієнтів кардіологічного та діабетичного профілів. Зокрема, було використано класифікаційні моделі для оцінювання ефективності лікування та виявлення закономірностей у клінічних даних, що дає змогу здійснювати детальнішу стратифікацію пацієнтів за перебігом захворювання [10], розроблено програмний модуль підтримки прийняття рішень лікарем, який інтегрує алгоритми машинного навчання для вибору тактики лікування з урахуванням індивідуальних особливостей пацієнтів [11-12]. Окремим напрямом є застосування методів глибокого навчання для підтримки клінічних рішень у діагностуванні серцево-судинних, урологічних та інших захворювань, де нейронні мережі використовуються для аналізу складних нелінійних взаємозв'язків між клінічними показниками [13-14].

Мета статті

Метою статті є аналіз можливостей застосування методів Data Mining та машинного навчання для аналізу клінічних даних задля визначення ступеня тяжкості стану пацієнтів і стратифікації ризику ускладнень у двох завданнях дослідження: визначення тяжкості стану пацієнтів із захворюваннями дихальної системи на тлі ПТСР та ускладнень у дорослих пацієнтів із цукровим діабетом 1-го типу. У межах дослідження передбачається: (1) виявити асоціації між тяжкістю бронхіту, частотою епізодів ГРВІ та показниками ПТСР, розладами сну, інтегральним показником якості життя та інтенсивністю бойових дій у регіоні проживання; (2) проаналізувати ускладнення перебігу цукрового діабету 1-го типу за допомогою класифікаційних моделей та кластеризації для виявлення внутрішньої стратифікації ризиків бінарних клінічних ознак.

Матеріали та методи

Об'єктом нашого дослідження є дві групи пацієнтів: діти віком від шести місяців до 16 років із захворюваннями дихальної системи, посттравматичним стресовим розладом (ПТСР), розладами сну та дорослі хворі на діабет першого типу. Проаналізувати залежності тяжкості захворювання бронхітом від регіону проживання за інтенсивністю бойових дій, кількістю епізодів ПТСР, а також вплив показників «якості життя» (за результатами тестування пацієнтів лікарем). У пацієнтів з діабетом 1-го типу виявлено наявність ускладнень. Детальніша стратифікація пацієнтів на більш ніж бінарні категорії (наявне або відсутнє ускладнення) можуть допомогти у діагностичних заходах, у визначенні ризиків ускладнень, зокрема виявлення кластерної структури ускладнень у разі діабету 1-го типу.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу клінічних даних було застосовано комплексний підхід Data Mining, який дає змогу використовувати широкий спектр методів від описової статистики до машинного навчання (зокрема нейронні мережі). Для кожного завдання, кожної

зазначеної досліджуваної когорти (дата сетів) було застосовано різні підходи.

Виявлення впливу психоемоційних станів дітей на тяжкість та частоту гострої респіраторної вірусної інфекції (ГРВІ). Для когорти дітей з ГРВІ було застосовано статистичні методи для аналізу якості життя (інтегральна оцінка шляхом анкетування лікарем пацієнта), тяжкості ПТСР, бронхіту, частотою ГРВІ та місця проживання (за інтенсивністю бойових дій). Досліджено дані про дітей віком від 6ти місяців до 16ти років з різних міст та регіонів України, із захворюванням дихальної системи в часовому проміжку з 2022 по 2023 роки.

Діти із захворюваннями дихальних шляхів на тлі ПТСР та інтенсивності «бойових дій» у місці проживання розділені на три категорії за місцем перебування, кожна категорія відповідає інтенсивності бойових дій, де 0 – найменша інтенсивність.

Визначено три кластера (групи) дітей за ступенем інтенсивності бойових дій у місті проживання пацієнтів. Попередній аналіз виявив часткову невідповідність ступеня тяжкості бронхіту інтенсивності бойових дій у місті проживання пацієнтів. Статистично значуща різниця є між групами з найменшою та найбільшою інтенсивностями. Середня група за інтенсивністю статистично не відрізняється від двох інших (рис. 1).

Таблиця 1

Розподіл міст проживання досліджуваних пацієнтів за категорією інтенсивності «бойових дій»

Місто	Категорія (інтенсивність)
Львів	0
Черкаси	0
Вінниця	0
Кропивницький	0
Житомир	1
Бердичів	1
Київ	1
Біла Церква	1
Харків	2
Одеса	2
Запоріжжя	2
Ромни	2
Кривий Ріг	2
Полтава	2
Дніпро	2
Суми	2

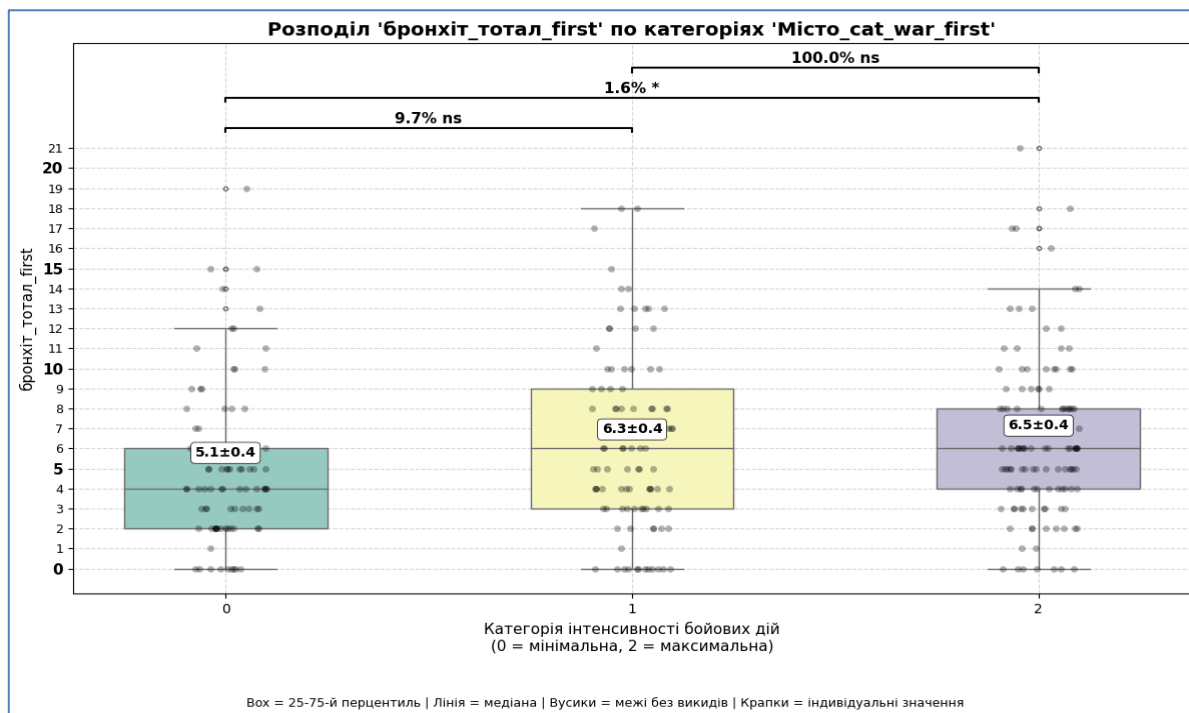


Рис. 1 – Розподіл ступеня тяжкості бронхіту у групах за інтенсивністю бойових дій у місті проживання пацієнтів

Здійснено аналіз змін інтегрального показника тяжкості бронхіту в залежності від частоти епізодів ГРВІ в 2022-2023 роки (рис. 2). Виявлено сім кластерів

(груп) пацієнтів за цим показником. Визначено тенденцію до зростання тяжкості бронхіту із збільшенням частоти ГРВІ.

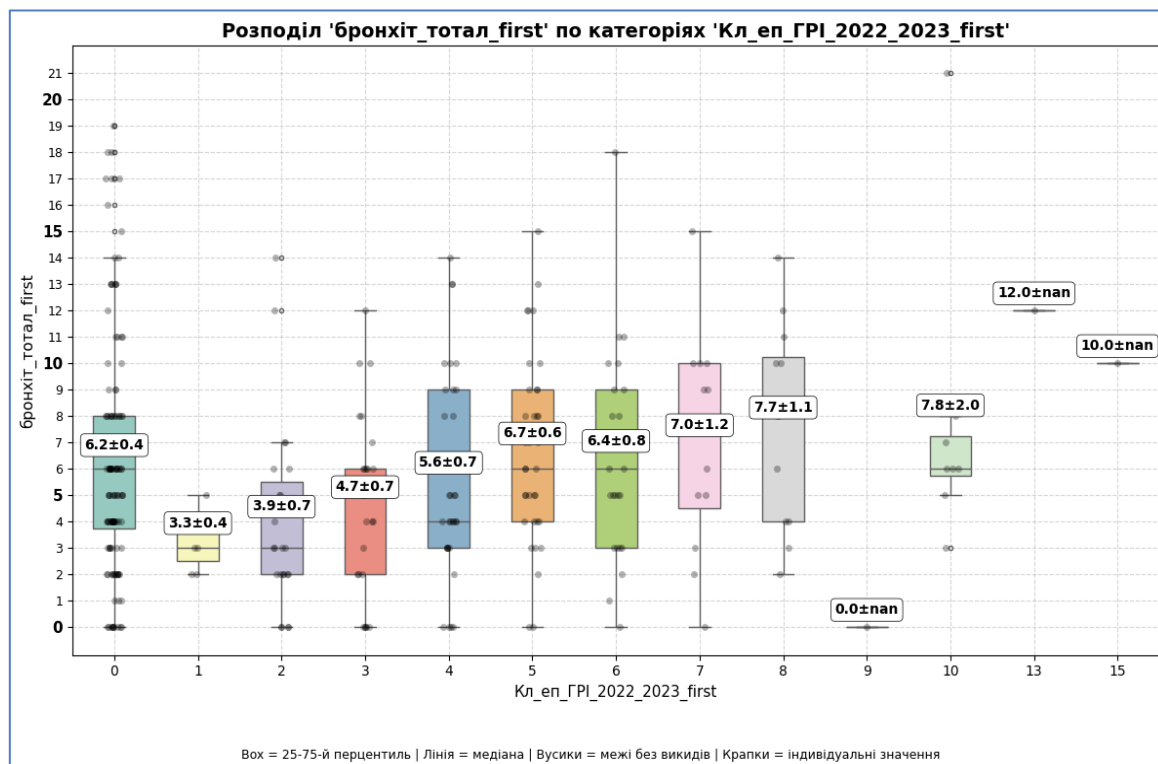


Рис. 2 – Зміни інтегрального показника тяжкості бронхіту в залежності від частоти епізодів ГРВІ в 2022-2023 роки

Подальший аналіз цільових показників, а саме показника якості життя (зважена сума балів внаслідок проведеного лікарем опитування), виявив статистично достовірну різницю між визначеними двома групами

пацієнтів – зі збільшенням кількості епізодів ГРВІ погіршується якість життя (рис. 3). Слід зауважити, що з огляду на специфіку лікарського опитувальника для якості життя більший бал – гірше.

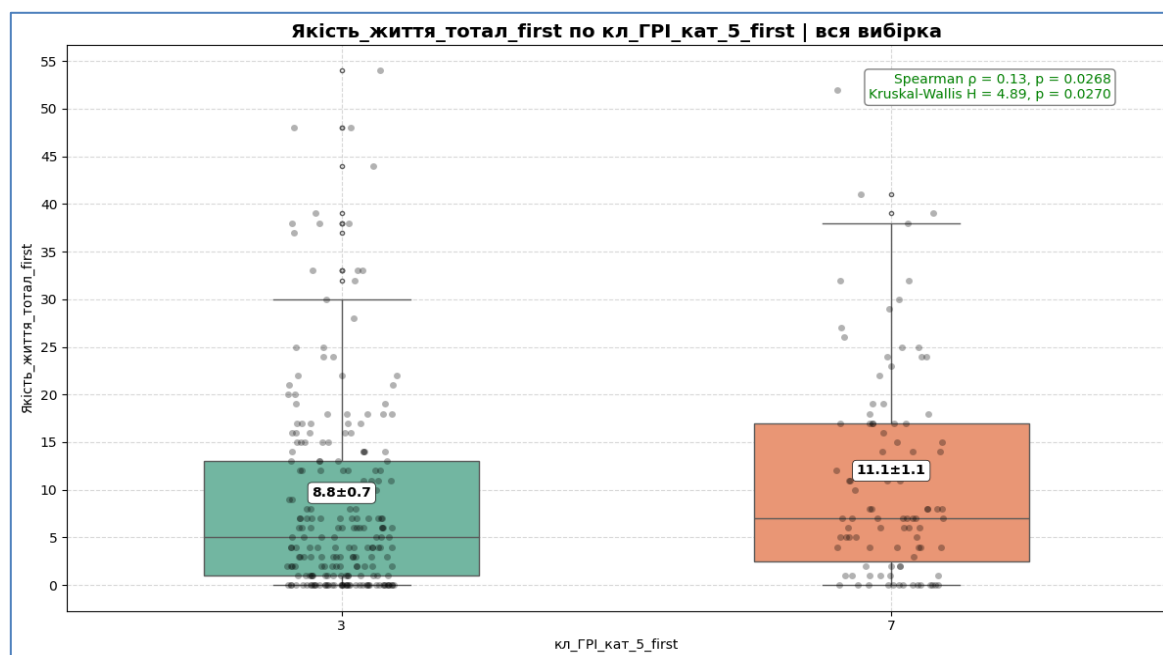


Рис. 3 – Зміни показника «якість життя» від частоти ГРВІ

Для поглибленого аналізу залежності якості життя було використано машинне навчання, а саме випадковий ліс (Random Forest, алгоритм Permutation Importance), який дає змогу оцінити реальну важливість ознак для класифікації (або регресії).

Виявлено залежність якості життя від PCL (показник ПТСР), SDSC (розлади сну), сукупності показників стресових розладів тощо. Визначено, що ПТСР, розлад сну та стресові розлади демонструють статистично достовірну кореляцію із якістю життя (рис. 4).

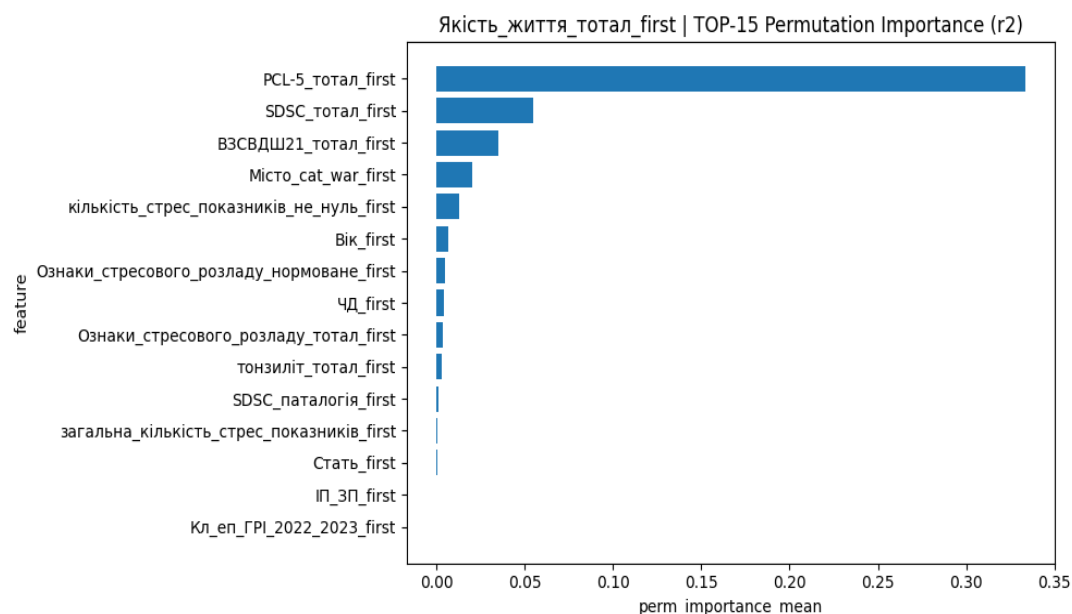


Рис. 4 – Кореляція ПТСР, розлад сну та стресові розлади демонструють статистично достовірну із якістю життя

Використання машинного навчання дає змогу за необхідності оцінити результати дослідження, виявити залежності в першому наближенні. Можливість пришвидженого попереднього аналізу дає змогу за необхідності зосередитись на детальному аналізі особливостей визначених кластерів (груп) та пошуку асоціацій і кореляцій всередині певних кластерів та груп.

Дослідження тяжкості захворювання на діабет 1-го типу та стратифікацію ускладнення на гепатоз. Для виконання другого завдання, за допомогою

методів машинного навчання (моделей класифікації, кластеризації тощо) було проаналізовано ускладнення у разі захворювання на діабет 1-го типу. Для цього за даними пацієнтів було вибрано чотири цільові показники (ускладнення перебігу діабету 1го типу), а саме: діабетична полінейропатія; нефропатія; діабетичний гепатоз; мікроангіопатія ніг. Використання методів Data mining надало можливість проаналізувати важливість та ступінь впливу клінічних показників на ускладнення перебігу діабету (рис. 5).

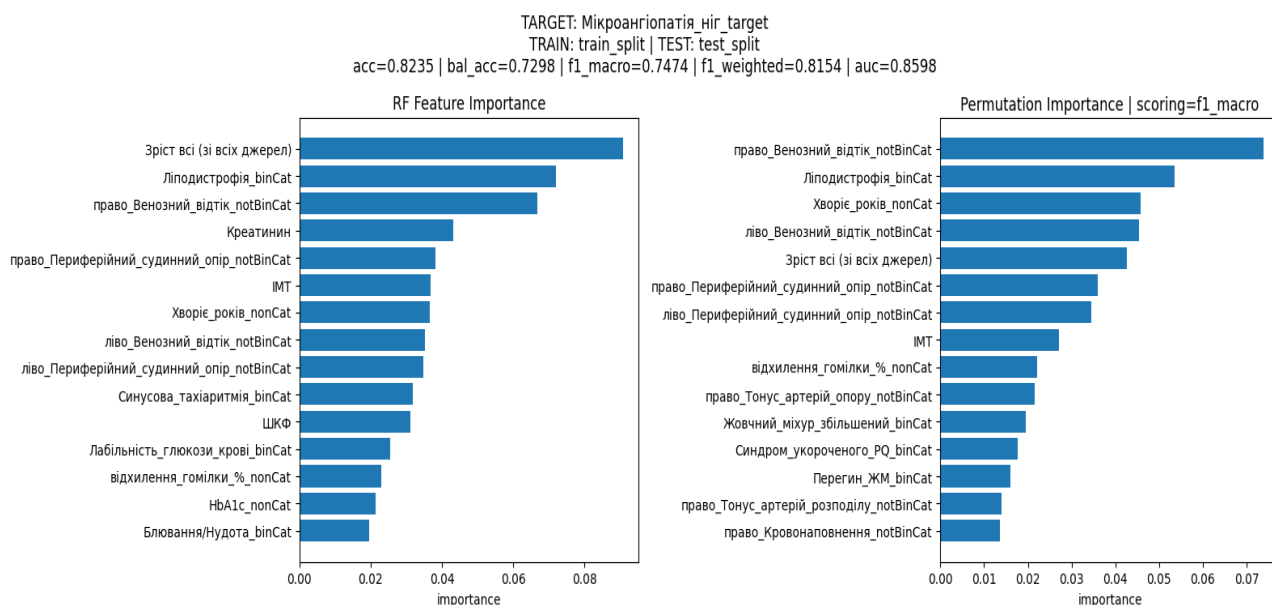


Рис. 5 – Розподіл важливості клінічних показників на наявність діагнозу мікроангіопатія ніг

Також дало змогу проаналізувати та стратифікувати рівні ризиків для певних ускладнень (гепатоз). Оскільки ускладнення перебігу захворювання наявні у бінарному вигляді (0 – без ускладнення, 1 – з ускладненням), серед моделей машинного навчання було вибрано випадковий ліс (Random Forest). Випадковий ліс є одним з найкращих методів, оскільки має нечутливість до статистичних викидів, виду даних (категоріальні, числові тощо), а також високу ефективність на відносно невеликих масивах даних. Застосовані моделі машинного навчання за методом випадкового лісу продемонстрували значення міри точності моделі F-1 на рівні 75-78% для більшості досліджуваних ускладнень та на рівні 66% – для діабетичного гепатозу. Міра F-1 це гармонійне середнє між характеристиками специфічності (*precision*) та чутливості (*recall*), що дає змогу у разі дисбалансу класів адекватно оцінити ефективність моделі.

Показник загальної точності (ACC, тобто відсоток правильних класифікацій) у разі дисбалансу класів не є інформативним, оскільки може бути високим (на рівні 90%) для класів з суттєвою різницею кількості пацієнтів в кожному з класів. Інформативнішим у таких випадках є показник F-1. Один з підходів до

покращення вибірки та моделі це балансування даних. Для подолання суттєвої нерівномірності досліджуваних класів застосовано метод балансування (SMOTE) та проведено оптимізацію гіперпараметрів моделі, зокрема глибини кількості та розгалуження дерев рішень, і вибір критерію розгалуження. Для аналізу було вибрано показник діабетичного гепатозу, за яким точність класифікаційної моделі була найменшою. Оптимізацію архітектури та балансування даних привело до покращення показника точності з 66% до 74%. Незважаючи на те, що цільовий параметр має 2 значення (наявність або відсутність ускладнення), кластеризація надала шість кластерів, які мають показники якості найкращі від 2-х до 10-ти включно (рисунок 6).

Кількість розмежованих кластерів може свідчити про різну тяжкість стану пацієнтів. Навіть для однієї групи, наприклад без ускладнень, можуть бути визначено різні ступені ризику ускладнення. Аналізуючи розподіл наявності та відсутності ускладнення у класерах, можливо дійти висновку, що певні групи мають тяжіння до ускладнення.

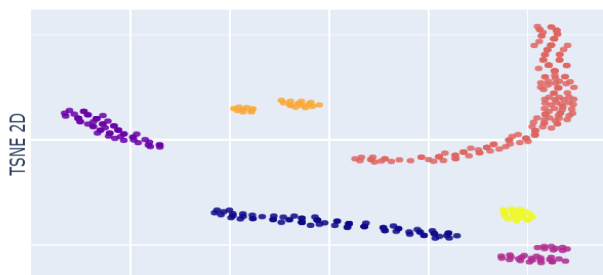


Рис. 6 – Результати кластеризації пацієнтів хворих на діабет за ознакою гепатоз

Алгоритмічну реалізацію методів Data Mining та машинного навчання здійснено в програмному середовищі Python з використанням бібліотек NumPy, Pandas, Scikit-learn, а також методів зниження розмірності та візуалізації багатовимірних даних (t-SNE, PCA) для аналізу результатів кластеризації.

Результати та їх обговорення

За допомогою класичних статистичних методів та комплексних підходів Data Mining отримано результати, які можуть бути корисними в клінічній медицині та в цілому у системі охорони здоров'я. Аналіз тяжкості стану дітей із захворюванням дихальної системи продемонстрував залежність тяжкості бронхіту від частоти епізодів ГРВІ, інтенсивності бойових дій у місті проживання тощо. Виявлено найважливіші предиктори для класифікації характеристики «якість життя». Проведений аналіз за допомогою методів машинного навчання тенденцій ускладнення на гепатоз для хворих на діабет 1го типу показав, що розподіл на більшу кількість кластерів, аніж два, надає додаткове уточнення структури ускладнень. Це уможливорює створення ефективніших прогностичних моделей розвитку певного ускладнення, що забезпечуватиме раннє ідентифікування пацієнтів, які знаходяться в групі ризику.

Висновки

Застосування методів Data Mining та машинного навчання до аналізу клінічних даних дає змогу ефективно виявляти приховані залежності та гетерогенні підгрупи пацієнтів, що не завжди є очевидним за використання виключно класичних статистичних підходів.

Встановлено залежність тяжкості бронхіту у дітей із захворюваннями дихальної системи від частоти епізодів ГРВІ, рівня показників посттравматичного стресу, розладів сну та інтенсивності бойових дій у регіоні проживання, а також визначено ключові предиктори, що впливають на якість життя пацієнтів.

Аналіз даних пацієнтів із цукровим діабетом 1-го типу показав, що розподілення досліджуваного масиву даних на більшу кількість кластерів надає можливість проведення докладнішого аналізу ризиків виникнення та подальшого розвитку ускладнень основного захворювання.

Отримані результати підтверджують доцільність використання ансамблевих моделей машинного навчання, зокрема випадкового лісу, для оброблення медичних даних, що характеризуються невеликими вибірками, зашумленістю та незбалансованістю класів.

Перелік використаних джерел

- [1] Досвід та перспективи створення медичних інформаційних систем та інформаційних технологій підтримки надання медичної допомоги / Коваленко О. С., Козак Л. М., Наджифіан Туманджані М., Романюк О. О. *Medical and Biological Cybernetics* 2022. Vol. 1 (207). Pp. 59-73. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.059>.
- [2] Phenotype clustering in health care: A narrative review for clinicians / T. J. Loftus et al. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 5. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.3389/frai.2022.842306>.
- [3] K-means Clustering Algorithms: A Comprehensive Review, Variants Analysis, and Advances in the Era of Big Data / A. M. Ikotun et al. *Information Sciences*. 2023. Vol. 622. Pp. 178-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139>.
- [4] A Brief Review on Medical Data and Clustering Algorithms for Smart Healthcare System: Challenges and Opportunities / Jandachot S., Simmachan T., Shakya S., Boonkroong P. *The 7th International Conference on Applied Statistics 2024 (ICAS2024)*, Chiang Mai, Thailand, 24-25 October 2024. Pp. 24-40.
- [5] Quispe Hilasaca S. M. Review on the Optimization of Unsupervised Clustering Models in Healthcare. Preprint 2109.07771. 2024. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202412.1423.v1>.
- [6] Scalable Clustering of Complex ECG Health Data: Big Data Clustering Analysis with UMAP and HDBSCAN / V. Kaverinskiy et al. *Computation*. 2025. Vol. 13(6). Article 144. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation13060144>.
- [7] Cluster analysis of adult individuals with type 1 diabetes: Treatment pathways and complications over a five-year follow-up period / F. J. Somolinos-Simón et al. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2024. Vol. 215. Article 111803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2024.111803>.
- [8] Longitudinal Phenotypes of Type 1 Diabetes in Youth Based on Weight and Glycemia and Their Association With Complications / A. R. Kahkoska et al. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2019. Vol. 104, iss. 12. Pp. 6003-6016. DOI: <https://doi.org/10.1210/jc.2019-00734>.
- [9] Identification of type 1 diabetes risk phenotypes using an outcome-guided clustering analysis / Y. Lu et al. *Diabetologia Clinical, Translational and Experimental Diabetes and Metabolism*. 2024. Vol. 67. Pp. 2507-2517. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00125-024-06246-w>.
- [10] Застосування класифікаційних моделей за

методами Data Mining та інформаційної технології для аналізу результатів лікування пацієнтів кардіологічного та діабетичного профілів / О.С. Коваленко та ін. *Medical and Biological Cybernetics*. 2023. Vol. 1(211). Pp. 77-89. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt211.01.077>.

- [11] Програмний модуль підтримки прийняття рішень лікарем при виборі тактики лікування / О.С. Коваленко та ін. *Біомедична інженерія і технологія*. 2025. Вип. 17(1). С. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.20535/2025.17.328254>.

- [12] Застосування методів глибокого навчання у підтримці прийняття клінічних рішень при діагностиці серцево-судинних захворювань / О.С. Коваленко

та ін. *Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології* : збірник праць Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції, м. Дніпро, 26 березня 2025. С. 182-186.

- [13] Clinical Applications of Machine Learning for Urolithiasis and Benign Prostatic Hyperplasia: A Systematic Review / D. Bouhadana et al. *Journal of Endourology*. 2023. Vol. 37(4). Pp. 182-185. DOI: <https://doi.org/10.1089/end.2022.0311>.
- [14] Universal representations in cardiovascular ECG assessment: A self-supervised learning approach / Z.-Y. Liu et al. *International Journal of Medical Informatics*. 2025. Vol. 195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2024.105742>.

DATA MINING METHODS AND MACHINE LEARNING AS TOOLS FOR ANALYZING PATIENT CONDITIONS AND DISEASE COMPLICATIONS BASED ON CLINICAL DATA

Biliavenko L.V.

postgraduate student, junior Researcher, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0602-1072>, e-mail: leoniditill@gmail.com;

Kovalenko O.S.

D.Sc. (Medical Sciences), professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6635-0124>

The article investigates the possibilities of applying Data Mining methods and machine learning techniques for the analysis of clinical data in the context of complex medical conditions characterized by high heterogeneity of disease progression and an increased risk of complications. The relevance of the study is determined by the rapid digitalization of the healthcare system, the growth of medical data volumes, and the need to implement personalized approaches to diagnosis, treatment, and rehabilitation of patients. Particular attention is paid to data analysis in pediatric practice and endocrinology, where traditional statistical methods are often insufficient for identifying complex nonlinear relationships. The objects of the study include two clinical cohorts: children aged from six months to sixteen years with respiratory system diseases associated with post-traumatic stress disorder, and adult patients with type 1 diabetes mellitus presenting various complications of disease progression. Within the scope of the research, a comprehensive approach was applied that combines descriptive statistical methods with machine learning algorithms, including ensemble models, feature importance evaluation methods, and clustering analysis. For the pediatric cohort, relationships between bronchitis severity, frequency of acute respiratory viral infections, post-traumatic stress indicators, sleep disorders, an integrated quality-of-life index, and the intensity of hostilities in the region of residence were analyzed. For the cohort of patients with type 1 diabetes mellitus, complications of disease progression were analyzed using classification and clustering methods, which made it possible to identify internal risk stratification even within clinically binary outcome variables. The results demonstrate that the application of machine learning methods not only improves the accuracy of clinical data analysis but also enables the identification of latent patient groups with different degrees of disease severity and potential risk of complication development. The proposed approach can be used as a clinical decision support tool and as a basis for further research in the field of personalized and preventive medicine.

Keywords: Data Mining, machine learning, data analysis, ensemble models, random forest, clustering analysis, feature importance evaluation, risk stratification, clinical data.

References

- [1] O.S. Kovalenko, L.M. Kozak, M.N. Tumajani, and O.O. Romanyuk, "Dosvid ta perspektyvy stvorennia medychnykh informatsiynykh system ta informatsiynykh tekhnolohii pidtrymky nadannia medychnoi dopomohy" ["Experience and prospects of creating medical information systems and information technologies to support medical care"], *Medical and Biological Cybernetics*, vol. 1 (207), pp. 59-73, 2022. doi: [10.15407/kvt207.01.059](https://doi.org/10.15407/kvt207.01.059). (Ukr.)
- [2] T.J. Loftus et al., "Phenotype clustering in health care: A narrative review for clinicians," *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 5, pp. 1-11, 2022. doi: [10.3389/frai.2022.842306](https://doi.org/10.3389/frai.2022.842306).
- [3] A.M. Ikotun, A.E. Ezugwu, L. Abualigah, B. Abuhaija, and J. Heming, "K-means Clustering Algorithms: A Comprehensive Review, Variants Analysis, and Advances in the Era of Big Data," *Information Sciences*, vol. 622, pp. 178-210, 2023. doi: [10.1016/j.ins.2022.11.139](https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139).

- [4] S. Jandachot, T. Simmachan, S. Shakya, and P. Boonkroong, "A Brief Review on Medical Data and Clustering Algorithms for Smart Healthcare System: Challenges and Opportunities," in *Proc. of the 7th Int. Conf. on Applied Statistics 2024 (ICAS2024)*, Chiang Mai, Thailand, Oct. 24-25, 2024, pp. 24-40.
- [5] S.M. Quispe Hilasaca, "Review on the Optimization of Unsupervised Clustering Models in Healthcare," 2024, *preprint 2109.07771*. doi: **10.20944/preprints202412.1423.v1**.
- [6] V. Kaverinskiy, I. Chaikovsky, A. Mnevets, T. Ryzhenko, M. Bocharov, and K. Malakhov, "Scalable Clustering of Complex ECG Health Data: Big Data Clustering Analysis with UMAP and HDBSCAN," *Computation*, vol. 13(6), article 144, 2025. doi: **10.3390/computation13060144**.
- [7] F.J. Somolinos-Simón, G. García-Sáez, J. Tapia-Galisteo, R. Corcoy, and M.E. Hernando, "Cluster analysis of adult individuals with type 1 diabetes: Treatment pathways and complications over a five-year follow-up period," *Diabetes Research and Clinical Practice*, vol. 215, article 111803, 2024. doi: **10.1016/j.diabres.2024.111803**.
- [8] A.R. Kahkoska et al., "Longitudinal Phenotypes of Type 1 Diabetes in Youth Based on Weight and Glycemia and Their Association With Complications," *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, vol. 104, iss. 12, pp. 6003-6016, 2019. doi: **10.1210/jc.2019-00734**.
- [9] Y. Lu et al., "Identification of type 1 diabetes risk phenotypes using an outcome-guided clustering analysis," *Diabetologia Clinical, Translational and Experimental Diabetes and Metabolism*, vol. 67, pp. 2507-2517, 2024. doi: **10.1007/s00125-024-06246-w**.
- [10] O.S. Kovalenko, L.M. Kozak, O.A. Kryvova, V.V. Bychkov, and L.V. Nenasheva, "Zastosuvannia klasyfikatsiinykh modelei za metodamy Data Mining ta informatsiinoi tekhnologii dlia analizu rezultativ likuvannia patsientiv kardiologichnoho ta diabetichnoho profiliv" ["Application of classification models by data mining and information technology for analyze the results of treatment of cardiac and diabetic patients"], *Medical and Biological Cybernetics*, vol. 1(211), pp. 77-89, 2023. doi: **10.15407/kvt211.01.077**. (Ukr.)
- [11] O. Kovalenko, L. Kozak, O. Averyanova, L. Bilyavenko, and O. Kutsiak, "Prohramnyi modul pidtrymky pryiniattia rishen likarem pry vybori taktyky likuvannia" ["Software module for doctor decision-making support when choosing treatment tactics"], *Biomedychna inzheneriia i tekhnolohiia – Biomedical Engineering and Technology*, vol. 17(1), pp. 52-59, 2025. doi: **10.20535/2025.17.328254**. (Ukr.)
- [12] O.S. Kovalenko et al., "Zastosuvannia metodiv hlybokoho navchannia u pidtrymtsi pryiniattia klinichnykh rishen pry diahnostytsi sertsevo-sudynnykh zakhvoriuvan" ["Application of deep learning methods in supporting clinical decision-making in the diagnosis of cardiovascular diseases"], in *Proc. of the All-Ukrainian Sci. and Techn. Internet Conf. «Automation and biomedical and computer technologies»*, Dnipro, Ukraine, March 26, 2025, pp. 182-186. (Ukr.)
- [13] D. Bouhadana et al., "Clinical Applications of Machine Learning for Urolithiasis and Benign Prostatic Hyperplasia: A Systematic Review," *Journal of Endourology*, vol. 37(4), pp. 182-185, 2023. doi: **10.1089/end.2022.0311**.
- [14] Z.-Y. Liu et al., "Universal representations in cardiovascular ECG assessment: A self-supervised learning approach," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 195, 2025. doi: **10.1016/j.ijmedinf.2024.105742**.
- Стаття надійшла 18.09.2025
Стаття прийнята 01.11.2025
Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Білявенко Л. В., Коваленко О. С. Методи Data Mining та машинне навчання як засоби аналізу стану пацієнтів та ускладнень захворювань за клінічними даними. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 55-63. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350990>.

ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІОНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ
РУХОВОЇ АКТИВНОСТІ «MTEST»

Куцяк О.А.	канд. техн. наук, зав. відділу, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2277-7411 , e-mail: spirotech85@ukr.net ;
Пезенцалі Г.О.	канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6319-6993 , e-mail: annp.irtc@gmail.com ;
Кріщанович М.Ю.	пров. інженер, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0032-7698 , e-mail: tornhold@gmail.com

Причинами порушення / втрати рухової активності можуть бути як центральні, так і периферичні ураження, зокрема поранення, травми та парези різного генезу. Повноцінну реабілітацію рухової активності пов'язано з адекватною стану пацієнта мобілізацією резервів організму на її відновлення. Вирішення задачі відновлення рухової активності пов'язано із застосуванням її діагностики на всіх етапах реабілітації. Мета статті – адаптація розробленої методики кількісного оцінювання рухової активності до периферичних уражень і проєктування її технічної реалізації як інформаційної системи діагностування рухової активності «MTest». В роботі описано розроблену методику кількісного оцінювання рухової активності, адаптовану до периферичних уражень, на основі якої створено цифрові засоби її діагностики. Розроблено структурно-функційну схему, програмний алгоритм діагностики рухової активності, UML-діаграми діяльності у програмній системі «MTest». Моделювання, попередня лабораторна та клінічна апробація цієї програмної системи підтвердили ефективність запропонованих рішень і доцільність їх застосування у клінічній практиці. Значення одержаних результатів полягає у створенні основи створення сучасних інформаційних технологій цифрової медицини, спрямованих на підвищення ефективності відновлення рухової активності людини, персоналізацію лікування й інтеграцію елементів штучного інтелекту у прийняття медичних рішень. Соціальне значення розроблених підходів полягає у підвищенні ефективності реабілітації у разі периферичних уражень, що має особливу актуальність в умовах воєнних і післявоєнних реалій.

Ключові слова: рухова активність, інформаційна допомога, діагностика, моделі, алгоритми, програмні системи, інформаційна система, інформаційна технологія.

Постановка проблеми

Значення рухової активності в житті людини неможна переоцінити. Сьогодні це один з найнеефективніших засобів відновлення здоров'я. Причинами порушення / втрати рухової активності можуть бути захворювання / ураження як центральні (інсульт, ДЦП), так і периферичні, зокрема поранення, травми та парези різного генезу.

Повноцінна реабілітація рухової активності пов'язана з адекватною стану пацієнта мобілізацією резервів організму на відновлення цих пошкоджених або втрачених функцій. Вирішення задачі відновлення рухової активності пов'язано із застосуванням її діагностики на всіх етапах реабілітації. Така діагностика передбачає кількісне оцінювання глибини порушень рухів кінцівок (зокрема тонкої моторики кисті для відновлення мовлення). Таку задачу може бути вирішено із застосуванням методів і засобів цифрової медицини, а також елементів штучного інтелекту.

Кількість пацієнтів, військових і цивільних, дорослих і дітей, з патологією рухової активності значно збільшилась внаслідок воєнних дій. Умови воєнного і післявоєнного стану висувають першочергові вимоги до розроблення та впровадження нових інформаційних технологій оцінювання / відновлення рухової

активності, серед яких головними є персоналізація, мобільність, оперативність, зручність сприйняття і застосування не тільки у профільних медичних установах, але й у військовій медицині.

У попередніх дослідженнях [1] розроблено методику кількісного оцінювання рухової активності на базі експертного оцінювання за основними та додатковими доказовими критеріями у пацієнтів після інсультів, а її апробація підтвердила переваги та доцільність її застосування у клінічній практиці [1]. Проте в ній не враховано оцінювання рухової активності, що є наслідком периферичних уражень, зокрема травм, поранень тощо. В цій роботі здійснено адаптацію такої методики до подібних задач і спроектовано інформаційну систему діагностування рухової активності «MTest», яка цю методику реалізує.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасний стан проблеми. У світовій практиці для діагностики рухової активності пацієнтів застосовуються різні методи та засоби. Широко у практиці оцінювання рухової активності застосовують метод тривимірного захоплення рухів [2-4]. Також є комплекси оцінювання рухів, що застосовують гібридні сенсори, які поєднують функції електроміографії,

акселерометра та гіроскопа [5-8].

У системах оцінювання рухової активності [3, 5-7] спрямовано здебільшого на оцінювання порушень рухів верхньої кінцівки.

Зазвичай для оцінювання рухової активності застосовують інструментальні методи: динамометрія (сила м'язів) [9], гоніометрія (обсяг рухів) [10], міотометрія (м'язовий тонус) [11], а також тестові методи експертного оцінювання.

Внаслідок здійсненого аналізу методів і засобів експертного оцінювання рухової активності варто виділити такі з них: *Rivermead Motor Assessment* (оцінювання верхньої та нижньої кінцівок, а також тулуба за двобальною градацією шляхом виконання пацієнтом тестів) [12]; *Motricity Index*; оцінювання рухової активності верхньої та нижньої кінцівок із застосуванням шкали з нерівномірною градацією у балах [13]; *Fugl-Meyer Stroke Scale* (рухова швидкість, обсяг рухів у суглобі, нерухові функції з нерівномірною градацією у балах) [14]; *Wolf Motor Function Test (WMFT)* (оцінювання за шестибальною градацією рухів верхньої кінцівки) [15]; *Stroke Impairment Assessment Set (SIAS)* (оцінювання моторних, сенсорних та рухових порушень на основі тестів, де ставиться сумарна оцінка; проте метод потребує певного інструментального супроводу) [16]; оцінювання за дев'ятибальною градацією на базі шкали *Medical Research Council scale* [9], тести неврологічного спрямування *Berg Balance Scale* [17], *National Institutes of Health Stroke Scale* [18] мають характер опитувальника, і крім пунктів, відповідальних за стан рухів, містять нерухові функції. У комплексах оцінювання рухової активності за шкалами експертного оцінювання [19-21] здійснюється за допомогою статистичних методів й надається узагальнений результат.

Хоча за такими методиками їхня спрямованість тільки на верхню кінцівку, нерівномірність градації шкал або ж характер шкали не дають змоги застосувати їх для цілей формування стратегії реабілітації рухів. Варто зазначити також малу доступність інструментальних засобів для оцінювання рухової активності у медичних закладах України. Для завдань подальшого відновлення рухової активності необхідно одержувати більшу кількість параметрів, а також враховувати всі сегменти кінцівок людини, зокрема тонку моторику кисті. Тому для кількісного оцінювання (діагностики) рухової активності можна застосовувати тестові методи експертного оцінювання рухової активності за доказовими критеріями, що є практичними і доступними.

Варто відзначити, що у світовій практиці немає таких програмних систем, які б забезпечували підтримку лікаря у діагностуванні рухів та ефективності їх відновлення як першого етапу у створенні персоналізованого плану відновлення рухової активності, пошкодженої після периферичних уражень.

Отже, інтеграція елементів штучного інтелекту, методики оцінювання рухової активності та програмного забезпечення дає змогу забезпечувати

інформаційну підтримку лікарю у прийнятті діагностичних рішень [22, 23].

Мета статті

Мета – адаптація розробленої методики кількісного оцінювання рухової активності до периферичних уражень і проєктування її технічної реалізації як інформаційної системи діагностування рухової активності «*MTest*» для підвищення ефективності відновлення рухової активності у цивільних і у військових після порушень, внаслідок подій повномасштабної війни.

Виклад основного матеріалу

Симптоматика рухових порушень залежить від локалізації та розміру патологічного вогнища. Спочатку довільні рухи може бути повністю втрачено, а потім плегія переходить у парез з переважним ураженням дистальних відділів кінцівок. Якщо внаслідок центральних уражень переважно страждають у руці м'язи-згиначі, а в нозі – м'язи-розгиначі, то внаслідок периферичних уражень може бути задіяно всі можливі комбінації м'язів.

З медичної практики відомо, що м'язи-згиначі мають вищий природний тонус порівняно з м'язами-розгиначами, а отже, акцент має бути на останніх. У разі підвищення м'язового тонусу на м'язі дозволяються тільки протилежні впливи, а саме на м'язи-антагоністи. У разі впливу на м'язи-агоністи з підвищеним тонусом (уражений м'яз та м'язи, що асистують йому в русі) може посилити й так високий тонус впритул до контрактури. Також нерівномірне підвищення тонусу м'язів призводить до формування спастики у суглобах руки і ноги [24-27].

Відновлення рухової активності має починатися і закінчуватися її експертним оцінюванням на кожному етапі реабілітації внаслідок центральних і периферичних уражень (зокрема, травм, поранень тощо).

Кількісне оцінювання порушень рухової активності відіграє важливу роль у цифровій медицині. Таке оцінювання допомагає лікарю зменшити помилку в оцінюванні перебігу та ефективності реабілітаційного процесу, а також є основою синтезу засобів інформаційної допомоги лікарю в діагностиці та відновленні рухової активності на різних етапах реабілітації.

В результаті аналізу у попередніх дослідженнях [1] для оцінювання порушень рухової активності вибрано основні та додаткові доказові критерії з відповідними шкалами оцінювання, які мають однакову шестибальну градацію та зіставляються зі шкалою динаміки парезу (що є зручним для формування сумарної кількісної оцінки) (рис. 1).

– *основні*: оцінювання за критеріями сили м'язів за шкалою та обсягу рухів проксимальних та дистальних відділів кінцівок на рівні суглобів [28];

– *додаткові*: оцінювання тонкої моторики кисті руки та форми ходи [29].

Інформаційно-структурну модель оцінювання

модель оцінювання рухової активності за доказовими критеріями надано на рис. 1.



Рис. 1 – Інформаційно-структурна модель оцінювання рухової активності за доказовими критеріями

Порівняно з наслідками інсульту, де розглядається тільки одна уражена сторона тіла (лівий або правий бік тіла), у разі периферичних уражень можемо розглядати різні комбінації: наприклад, ліва кисть і права нога, ліва рука і права рука тощо. Тому для оцінювання рухової активності внаслідок периферичних уражень (без виключення центральних уражень) розроблену методику адаптовано за рахунок введення додаткових параметрів: розташування (верхня або нижня кінцівка), бік (лівий або правий), тип м'яза (м'язи-згиначі або м'язи-розгиначі). Таку адаптацію подано на рис. 2.

Сумарне кількісне оцінювання порушень рухової активності здійснюється за рахунок припущення, що всі доказові критерії рівнозначні та характеризують ступінь парезу, та їх зіставлення у відповідних сегментах кінцівок, причому з інтервалами у балах відповідно до динаміки парезу [1].

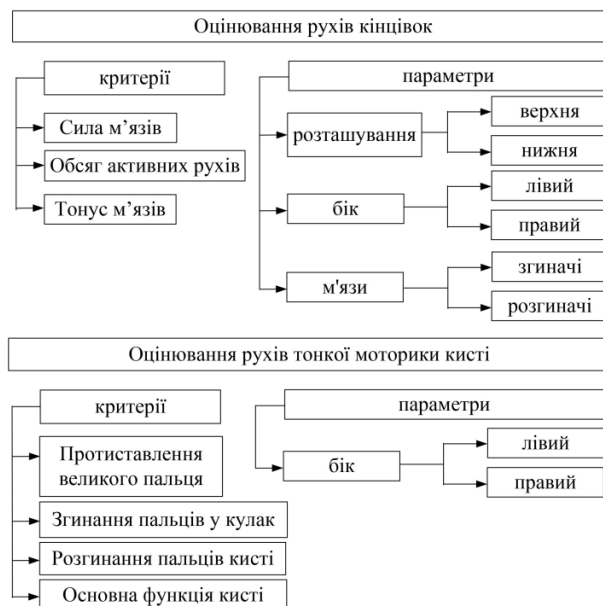


Рис. 2 – Інформаційно-структурна модель оцінювання рухової активності за доказовими критеріями з прив'язкою до додаткових параметрів

Зіставлення критеріїв показує, що максимальна сумарна оцінка у балах для сегментів кінцівок становить 10 балів, для тонкої моторики кисті – 20 балів. Це – найвищі показники, що показують відсутність порушень рухової активності. Для ходи сумарної оцінки немає, оскільки її подано одним критерієм.

Інтервали динаміки критеріїв для різних ступенів парезу запропоновано так, щоб в оцінюванні парезу для кожного сегменту кінцівок задіяно відповідну кількість критеріїв: для сегментів кінцівок (два критерії) поріг появи порушень починається з 9 балів, для тонкої моторики кисті (чотири критерії) – з 19 балів (табл. 1).

У відновленні рухової активності пацієнта постає необхідність досліджувати її динаміку відновлення на різних етапах реабілітації. Ефективність відновлення рухової активності визначається порівнянням її динаміки до і після реабілітації.

Таблиця 1

Сумарна кількісна оцінка порушень рухових функцій та динаміки ступеня парезу (модифіковано за [28])

СУМАРНЕ ОЦІНЮВАННЯ У БАЛАХ ЗА КРИТЕРІЯМИ						
Суглоби відділів верхньої та нижньої кінцівок						
Бали	0	1–2	3–4	5–7	8–9	10
Ступінь парезу	плегія (функції немає)	грубий	значний	помірний	легкий	немає порушень
Тонка моторика кисті						
Бали	0	1–4	5–8	9–15	16–19	20
Ступінь парезу	плегія (функції немає)	грубий	значний	помірний	легкий	немає порушень
Хода						
Бали	0	1	2	3	4	5
Ступінь парезу	плегія (функції немає)	грубий	значний	помірний	легкий	немає порушень

Введено градації ефективності з прив'язкою до вербальної оцінки: без змін, незначне покращення, покращення, значне покращення, за формулою $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1$, де Δ_1 – бали до реабілітації, Δ_2 – бали після реабілітації, Δ – різниця балів, яка показує ефективність реабілітації. Розподіл градацій позитивної ефективності надано у табл. 2.

Таблиця 2
Оцінювання ефективності реабілітації з відновлення моторних функцій [28]

Градації ефективності реабілітації рухів	Величина ефективності реабілітації рухів, Δ балів		
	Глобальні рухи на рівні суглобів	Тонка моторика кисті	Форма ходи
Значне покращення	5–10	9–20	3–5
Покращення	3–4	5–8	2
Незначне покращення	1–2	1–4	1
Без змін	0	0	0

Тонус м'язів. Крім зазначених критеріїв, на рівні сегментів кінцівок (суглобів) також оцінюється тонус м'язів. Під ним розуміють ступінь пружності м'яза і той спротив, який виникає в умовах пасивного розтягнення м'яза впродовж руху у суглобі. Його динаміка є важливим індикатором наявності і локалізації порушень, але визначити ці зміни не завжди легко.

Гіпертонус м'язів оцінюється за модифікованою шкалою Ашфорт [28, 30]. Крім того, спеціально розроблено шестибальну шкалу для оцінювання гіпотонусу [28], що є важливим складником оцінювання, зокрема, за периферичних уражень. Так само ці шкали мають однакову спрямованість. Проте цей критерій не входить в сумарну кількісну оцінку рухової активності, – він має значення у формуванні дозволених до застосування на м'язах вибраних сегментів кінцівок (зокрема, тонкої моторики кисті) програм міостимуляції в персоналізованому підході до відновлення рухової активності.

Переваги методики кількісного оцінювання рухової активності, адаптованої до периферичних уражень, на базі експертного оцінювання за основними та додатковими критеріями:

- є основою цифрової автоматизації діагностики рухової активності та подальшого формування персоналізованого плану тренування рухів для її відновлення;

- зв'язок доказових критеріїв з додатковими параметрами дає змогу оцінювати рухову активність різних вибраних сегментах кінцівок пацієнта у разі периферичних уражень;

- кількісне порівняння результатів до та після реабілітації сприяє точнішому прогнозуванню динаміки відновлення.

- створення точнішої градації відновлення рухів та зменшення помилки у формуванні кількісної сумарної оцінки рухових функцій уражених кінцівок.

Структурно-функційна організація програмної системи діагностики рухової активності «MTest». У попередніх дослідженнях на базі методики кількісного оцінювання розроблено програмну систему інформаційної допомоги лікарю в оцінюванні рухової активності MovementTestStroke [31], апробовану в умовах реабілітації пацієнтів після інсульту. Проте в такій системі не враховано можливості для оцінювання рухової активності в разі периферичних уражень, а також зручного подання інформації лікарю та накопичення результатів для подальшого аналізу, що особливо необхідно в умовах застосування для спостереження за руховою активністю, особливо після травм і поранень.

Тому постає завдання розробити програмну систему діагностики рухової активності «MTest» з розширеними функційними можливості в разі периферичних уражень на базі адаптованої методики кількісного оцінювання рухової активності.

Відповідною структурно-функційною моделлю на рис. 3 подано і описано взаємодію лікаря з програмною системою «MTest».

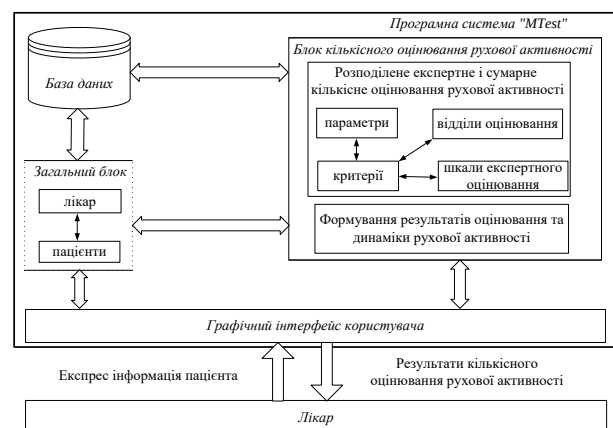


Рис. 3 – Структурно-функційна модель взаємодії лікаря з програмною системою кількісного оцінювання рухової активності пацієнта «MTest»

Система «MTest» складається з графічного інтерфейсу (далі – інтерфейс) та інформаційних блоків: Загального блоку, Баз даних (БД), Блоку кількісного оцінювання рухової активності (далі – Блок оцінювання). Ці блоки поєднано з інтерфейсом, що забезпечує лікарю діалоговий режим роботи з ними.

Інформаційний блок «База даних» призначено для фіксації і зберігання інформації про всіх пацієнтів, які проходять тестування рухової активності. В ньому є три компоненти: Список лікарів, Список пацієнтів та Персональний електронний медичний запис (ЕМЗ).

У **Загальному блоці** здійснюється реєстрація лікарів і пацієнтів. Після реєстрації інформація про лікарів записується в БД (Список лікарів) так, що лікар може

заходити в систему і бачити тільки своїх пацієнтів.

Після реєстрації інформація пацієнта (дата госпіталізації, прізвище-ініціали-стать пацієнта, номер медичної карти, прізвище лікаря) формує його персональний ЕМЗ в БД (Список пацієнтів, Персональний електронний медичний запис), де і записується. Список пацієнтів подається на інтерфейс таблично, і кожного пацієнта подано короткою довідкою на базі введенної інформації.

Інформаційний блок «Блок оцінювання» призначено для одержання кількісної оцінки рухової активності вибраних лікарем сегментів кінцівок, тонкої моторики кисті або ходи в балах за доказовими критеріями відповідно до шкал оцінювання, виведення на інтерфейс узагальнених результатів розподіленого та сумарного кількісного оцінювання, а також динаміки рухової активності в межах курсу реабілітації пацієнта.

Відповідно до призначення цей блок складається з компонентів: *Розподілене експертне та сумарне кількісне оцінювання рухової активності, Формування результатів оцінювання та динаміки рухової активності.*

Функційне призначення компонента *Розподілене експертне та сумарне кількісне оцінювання рухової активності* – розподілене подання об'єктів тестування рухових функцій (кінцівка, кисть, хода) та доказових критеріїв їх оцінювання, а також зв'язок доказових критеріїв зі шкалами оцінювання та додатковими параметрами для оцінювання у разі периферичних уражень.

Функційне призначення компонента *Формування результатів оцінювання та динаміки рухової активності* – формування текстової інформації про результати кількісного та сумарного оцінювання вибраних об'єктів тестування на поточному сеансі тестування рухової активності пацієнта в межах поточного курсу його реабілітації, а також для графічне виведення динаміки рухової активності в межах цього курсу реабілітації.

Власне програмний алгоритм діагностики рухової активності подано на рис. 4.

Лікар входить в систему за своїм паролем або реєструється у системі. Зайшовши в систему, лікар вибирає пацієнта для тестування рухової активності або реєструє у разі відсутності пацієнта в системі на базі його експрес-інформації з медичної карти. Наявність пацієнта у системі відкриває доступ до його персонального ЕМЗ в БД, де зберігаються результати розподіленого експертного та сумарного кількісного оцінювання рухової активності за доказовими критеріями в межах всього курсу реабілітації пацієнта.

Лікар може переглянути всю інформацію конкретного пацієнта з кожного сеансу тестування в межах реабілітації: динаміку рухової активності та інформацію про кількісне та сумарне оцінювання рухової активності.

Для цього програмно формується запит в БД, після чого відповідний результат виводиться на

інтерфейс. Динаміка виводиться на інтерфейс в табличному і графічному поданнях. Інформація виводиться текстово.

У профілі пацієнта лікар може вибрати наявний сеанс тестування або створити новий сеанс. Тоді у разі здійснення тестування рухової активності у вибраному сеансі лікар викликає форму, де вибирає об'єкт тестування (суглоби кінцівок, тонка моторика кисті або хода), а також доказові критерії та додаткові параметри: у разі оцінювання рухів кінцівок – її розташування (верхня або нижня), бік (лівий або правий) та тип м'яза (згинач або розгинач); у разі оцінювання рухів тонкої моторики кисті – бік (лівий або правий). У разі оцінювання ходи лікар вибирає тільки доказові критерії кількісного оцінювання.

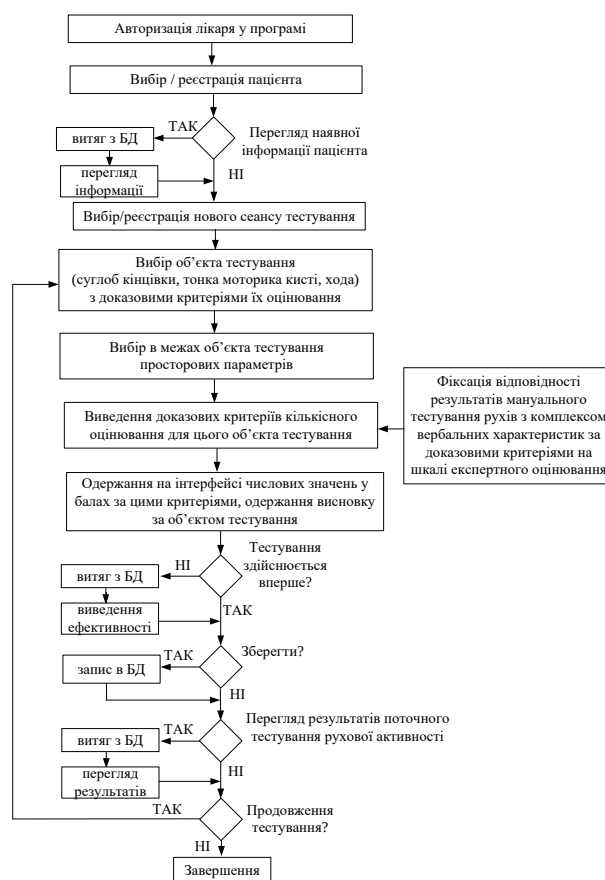


Рис. 4 – Програмний алгоритм оцінювання рухової активності пацієнта в системі «MTest»

Лікар виконує розподілене експертне оцінювання на базі відповідних шкал кількісного оцінювання рухів пацієнта за доказовими критеріями на рівні цього об'єкта:

- за основними доказовими критеріями (сила м'язів, обсяг рухів): рухи верхньої та нижньої кінцівок на рівні окремих суглобів у проксимальному (2 суглоба) та дистальному (1 суглоб) відділах;
- за додатковими доказовими критеріями: тонкої

моторики кисті (протиставлення великого пальця, згинання пальців у кулак, основна функція кисті – схоплення, розгинання пальців кисті) та форми ходи;

– тонус м'язів оцінюється не завжди, а тільки якщо надалі буде формування персоналізованого підходу до відновлення рухової активності на базі програм міостимуляції.

Для кожного доказового критерію за запитом лікаря на інтерфейс виводяться *шкали експертного оцінювання*, де лікар фіксує відповідність результатів мануального тестування рухової активності цього об'єкта комплексу вербальних характеристик за доказовими критеріями на цих шкалах. Такий вибір програмно переводиться в бал, що виводиться на інтерфейс.

Коли в межах вибраного об'єкта тестування здійснено необхідні дії з кількісного оцінювання за доказовими критеріями, програмно обчислюються сумарні кількісні оцінки (суглоби вибраних відділів верхньої або нижньої кінцівок, тонка моторика кисті або хода) та визначається ступінь парезу (табл. 1).

Якщо в межах курсу реабілітації тестування рухів пацієнта виконується не вперше, до цього компонента з БД надходять дані сумарної оцінки рухів за перше тестування. Шляхом порівняння сумарних оцінок поточного та першого тестувань обчислюються і виводяться на інтерфейс ефективність відновлення рухової активності (табл. 2).

Результати поточного тестування рухів у балах та ефективність відновлення рухів зберігаються у персональному ЕМЗ пацієнта БД.

В *блоці оцінювання* за запитом в БД можна вивести таблично результати поточного оцінювання всіх вибраних об'єктів тестування.

Розроблена структурно-функційна модель діагностики рухової активності відображає комплексну взаємодію лікаря та програмної системи. В моделі систематизовано етапи збирання, аналізу та інтерпретації даних, що забезпечує логічну послідовність у процесі прийняття рішень. Її реалізація дає змогу інтегрувати клінічні параметри в єдиний інформаційний простір і створити передумови для інтелектуальної підтримки лікаря під час діагностики рухової активності пацієнта. Практичне значення полягає в оцінюванні рухової активності за периферичних уражень. Розроблені модель та програмний алгоритм можуть бути основою програмних систем цифрової медицини, підвищуючи ефективність діагностики, а також стратегій відновлення рухової активності.

Взаємодія лікаря з програмною реалізацією системи «MTest». Програмну реалізацію системи діагностики рухової активності «MTest» призначено для застосування в клініках, зокрема клініках військової медицини. Ця система є апаратнезалежною. В інтерфейсі програми визначено роль лікаря та його взаємодію з цією програмною системою, що подано UML-діаграмою прецедентів (рис. 5). Програмна реалізація системи «MTest» – середовище MS Visual Studio 2022, мова програмування C#, встановлено у структурі ПК.

Лікар здійснює авторизацію, веде реєстр пацієнтів, вносить у програму дані пацієнта, фіксує у програмі результати тестування рухової активності, а також аналізує динаміку відновлення рухової активності пацієнтів.

Бізнес-процеси програмної реалізації системи «MTest». Відповідні UML-діаграми послідовностей відображають бізнес-процеси системи «MTest», а саме взаємодії впорядкованих у часі об'єктів.

Програмна реалізація системи «MTest» починається з входу лікаря у програму (рис. 6). На вході системи він має авторизуватися (логін / пароль) або зареєструватися у системі, й далі вже зайти в програму.



Рис. 5 – UML-діаграма прецедентів: роль і напрями взаємодії лікаря із системою діагностики рухової активності «MTest»

Далі програмно виводиться список пацієнтів, що міститься у БД. Якщо список пустий, то необхідно реєструвати пацієнта, ввівши його експрес-інформацію. Далі список пацієнтів оновлюється, і робота програми продовжується. Надалі бізнес-процеси відбуваються за діаграмою на рис. 7.

Лікар вибирає потрібного пацієнта, робиться програмно запит на виведення профілю пацієнта, в якому лікар може виконати:

- кількісне та сумарне оцінювання рухової активності (окремий сценарій);
- запит результатів діагностики рухової активності з виведенням текстової інформації;
- запит динаміки рухової активності з виведенням інформації в таблицях і графіках.

У разі запиту такої інформації програмно формується вибірка з БД, що містить потрібну інформацію як текст, таблично або графічно.

Після завершення всіх дій тестування лікар виходить з програми. Діагностика рухової активності здійснюється за окремим сценарієм (рис. 8).

На момент, коли лікар активує форму діагностики рухової активності, активним є лише випадний список з об'єктами тестування рухових функцій (кінцівки, суглоби, кисть, хода), а також випадні списки з додатковими параметрами (розташування кінцівки: верхня,

нижня; бік: лівий, правий; тип м'яза: м'яз-згинач або м'яз-розгинач). На цій основі формуються масиви даних для запису в БД.

Випадний список задає доказові критерії та їхню кількість на інтерфейсі. Коли лікар вибирає об'єкт тестувань, активуються доказові критерії з елементами керування.

Виведення полів доказових критеріїв відкриває перехід до вибору потрібної вербальної характеристики вибраної шкали експертного оцінювання на відповідність поточному стану рухової активності. Лікар фіксує ці вербальні характеристики, а програма переводить це в бал, повертає назад, і замість елемента фіксації з'являється числове значення у балах.

Після опрацювання всіх доказових критеріїв вибраного об'єкта тестування для нього програмно визначається ступінь парезу, що виводиться на інтерфейс. За умови, що цей об'єкт оцінюється не вперше, визначається ефективність його відновлення. Результати в межах поточного об'єкта тестування зберігаються у БД.

Впровадження програмної системи «MTest» як складника інтелектуальної інформаційної технології керування відновленням м'язових функцій здійснено в ДП «Санаторій Конча Заспа». У клінічних умовах діагностовано 25 пацієнтів, результати оцінювання динаміки відновлення рухової активності показало позитивну динаміку відновлення у 19 пацієнтів, в інших – без змін або незначна динаміка.

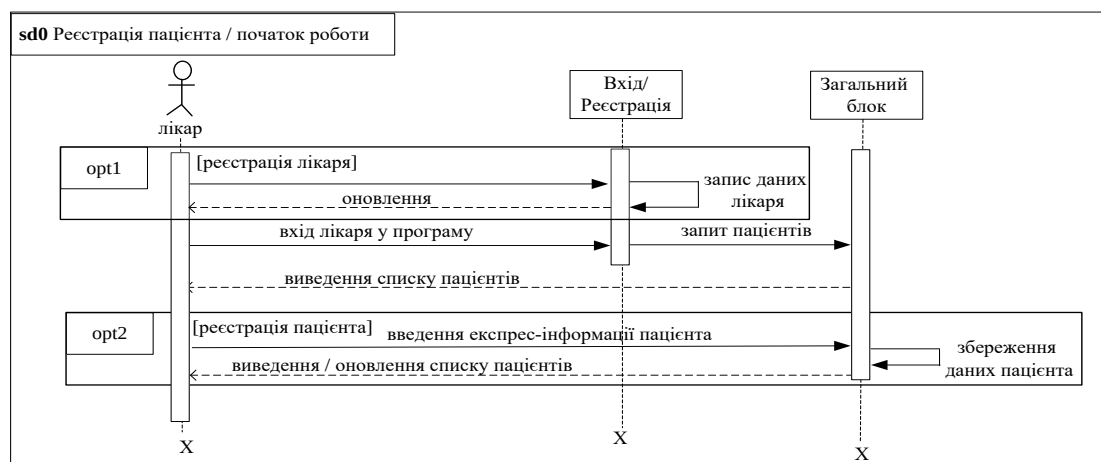


Рис. 6 – UML-діаграма послідовностей: реєстрація та початок роботи з програмою "MTest"

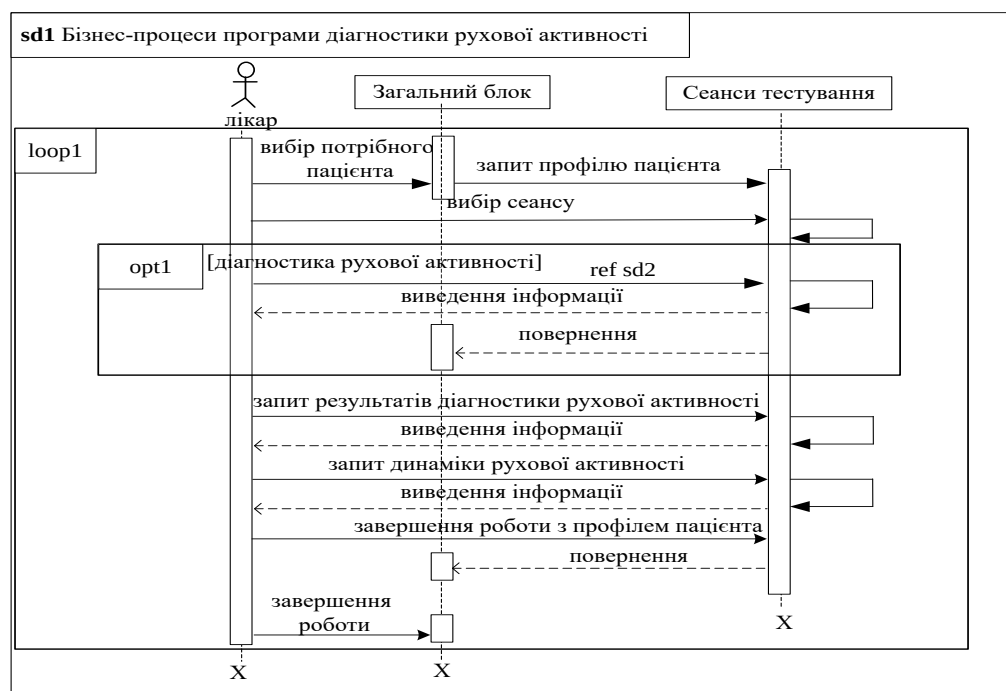


Рис. 7 – UML-діаграма послідовностей: основні бізнес-процеси програми "MTest"

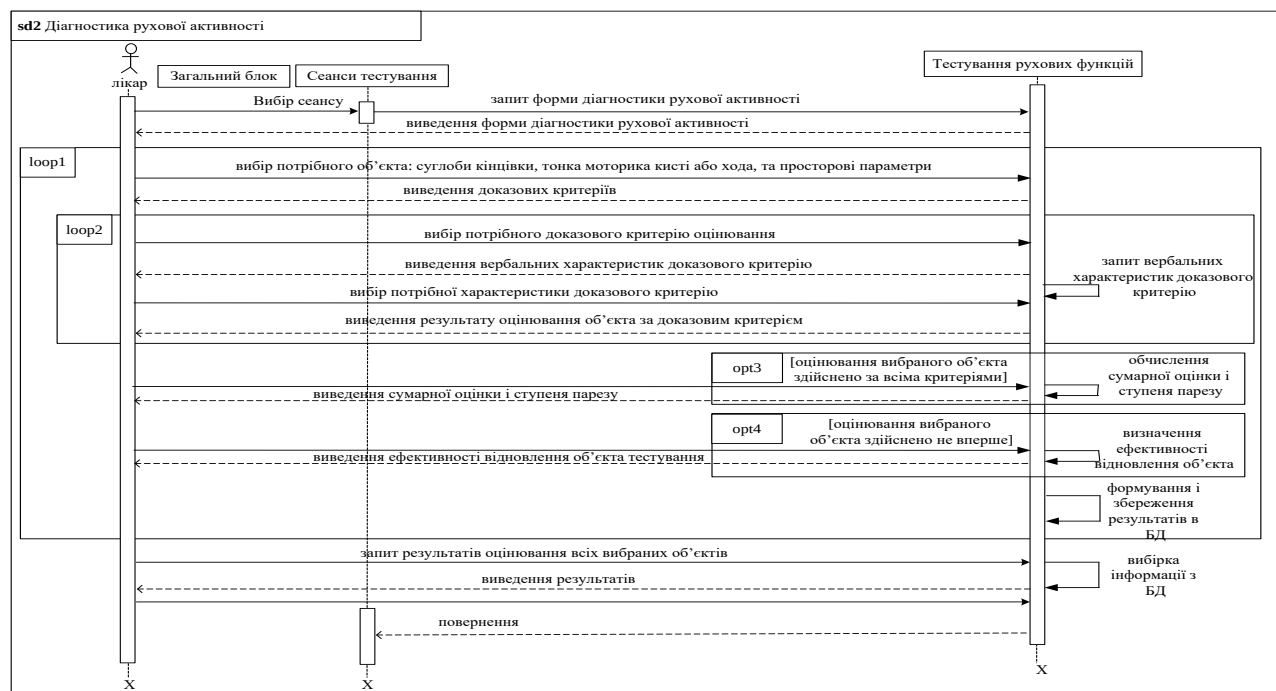


Рис. 8 – UML-діаграма послідовностей: бізнес-процеси діагностики рухової активності програми "MTest"

Висновки

Адаптовано розроблену методику кількісного оцінювання рухової активності, що забезпечує діагностику порушень рухової активності також за периферичних уражень, а також є основою розроблення цифрових засобів реабілітації м'язових функцій.

Розроблено алгоритм діагностики рухової активності, що його покладено в основу програмної системи, та спроектовано систему «MTest» для інформаційної підтримки лікаря на всіх етапах реабілітації, для оцінювання ним динаміки відновлення рухової активності.

Подальша клінічна апробація системи, реалізованої за наведеними результатами проектування, підтвердила ефективність запропонованих рішень і доцільність їх застосування у клінічній практиці. Одержані результати створюють основу для побудови сучасних інформаційних технологій цифрової медицини, спрямованих на підвищення ефективності відновлення рухової активності, персоналізацію лікування й інтеграцію елементів штучного інтелекту у прийняття медичних рішень. Розроблені підходи уможливають підвищення ефективності реабілітації у разі периферичних уражень, що має особливу актуальність в умовах воєнних і післявоєнних реалій.

Перелік використаних джерел

[1] Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту / Вовк М. І., Куцяк О. А., Лаута А. Д., Овчаренко М. А. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2017.

T. 189(3). C. 61-78. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt189.03.061>.

- [2] Digital Technology in Movement Disorders: Updates, Applications, and Challenges / J. L. Adams et al. *Current Neurology and Neuroscience Reports*. 2021. Vol. 21. Article 16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11910-021-01101-6>.
- [3] Corona F. Quantitative assessment of upper limb motor impairments in people with neurological diseases: Ph.D. dissertation : Industrial Engineering. Cagliari, 2018. 129 p.
- [4] Motor function diagnosis apparatus and method, and program: pat. JP6433805B2 Japan. № JP2015023677A; app. 09.02.2015; publ. 05.12.2018.
- [5] Motor Function Assessment of Upper Limb in Stroke Patients / B. Pan et al. *Journal of Healthcare Engineering*. 2021. Vol. 2021(1). Article 6621950. <https://doi.org/10.1155/2021/6621950>.
- [6] Maceira-Elvira P., Popa T., Schmid A-C. Wearable technology in stroke rehabilitation: towards improved diagnosis and treatment of upper-limb motor impairment. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2019. Vol. 16. Article 142. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0612-y>.
- [7] Jalloul N. Wearable sensors for the monitoring of movement disorders. *Biomedical journal*. 2018. Vol. 41. Pp. 249-253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bj.2018.06.003>.
- [8] Movement monitoring system and apparatus for objective assessment of movement disorders: pat. 2011/0213278A1 U.S. № US13/037,305;

- app. 28.02.2011; publ 01.09.2011.
- [9] Reliability and validity of the Medical Research Council (MRC) scale and a modified scale for testing muscle strength in patients with radial palsy / T. Paternostro-Sluga et al. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2008. Vol. 40(8). Pp. 665-671. DOI: <https://doi.org/10.2340/16501977-0235>.
 - [10] Reese N., Bandy W. Joint range of motion and muscle length testing. Elsevier Health Sciences, 2010. 509 p.
 - [11] The Utility of Myotonometry in Musculoskeletal Rehabilitation and Human Performance Programming / J. M. McGowen et al. *Journal of Athletic Training*. 2023. Vol. 58(4). Pp. 305-318. DOI: <https://doi.org/10.4085/616.21>.
 - [12] Assessment of arm function in stroke patients: Rivermead Motor Assessment arm section revised with Rasch analysis / Van de Winckel A., Feys H., Lincoln N., De Weerd W. *Clinical Rehabilitation*. 2007. Vol. 2(5). Pp. 471-479. DOI: <https://doi.org/10.1177/0269215507071783>.
 - [13] Collin C., Wade D. Assessing motor impairment after stroke: a pilot reliability study. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*. 1990. Vol. 53(7). Pp. 576-579. DOI: <https://doi.org/10.1136/jnnp.53.7.576>.
 - [14] Gladstone D. J., Danells C. J., Black S. E. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties. *Neurorehabil Neural Repair*. 2002. Vol. 16(3). Pp. 232-240. DOI: <https://doi.org/10.1177/154596802401105171>.
 - [15] Motor Recovery and Cortical Reorganization after Constraint-Induced Movement Therapy in Stroke Patients: A Preliminary Study / J. D. Schaechter et al. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2002. Vol. 16(4). Pp. 326-338. DOI: <https://doi.org/10.1177/154596830201600403>.
 - [16] Stroke Impairment Assessment Set (SIAS) / N. Chino et al. *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*. 1994. Vol. 31(2). Pp. 119-125. DOI: <https://doi.org/10.2490/jjrm1963.31.119>.
 - [17] Balance Scale is a Valid Measure for Plan Interventions and for Assessing Changes in Postural Balance in Patients with Stroke / K. Miyata et al. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2022. Vol. 54. DOI: <https://doi.org/10.2340/jrm.v54.4443>.
 - [18] Homola A. Methods of examination in physical therapy, and occupational therapy of people after stroke (clinical case.) *Ukrainian Scientific Medical Youth Journal*. 2024. Iss. 1(144). Pp. 151-161. DOI: [https://doi.org/10.32345/USMJ.1\(144\).2024.151-161](https://doi.org/10.32345/USMJ.1(144).2024.151-161).
 - [19] Jarm T., Kramar P., Županič A. Rating Stroke Patients Based on Movement Analysis. *Proceedings of the 11th Mediterranean Conference on Medical and Biomedical Engineering and Computing*, Ljubljana, Slovenia, 26-30 June 2007. Pp. 266-269. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-73044-6_66.
 - [20] Olesh E. V., Yakovenko S., Gritsenko V. Auto-mated Assessment of Upper Extremity Movement Impairment due to Stroke. *Plos One*. 2014. Vol. 9(8). Article e104487. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104487>.
 - [21] A motor function test system: pat. WO2005/039412A1 Italia. № PCT/IT2003/000660; app. 24.10.2003; publ 06.05.2005.
 - [22] Ahuja A. S. The impact of artificial intelligence in medicine on the future role of the physician. *PeerJ*. 2019. Vol. 7. Article e7702. DOI: <http://doi.org/10.7717/peerj.7702>.
 - [23] Buch V. H., Ahmed I., Maruthappu M. Artificial intelligence in medicine: current trends and future possibilities. *British Journal of General Practice*. 2018. Vol. 68(668). Pp. 143-144. DOI: <https://doi.org/10.3399/bjgp18X695213>.
 - [24] Extensor Muscles vs. Flexor Muscles. What's the Difference? URL: <https://thisvsthat.io/extensor-muscles-vs-flexor-muscles> (дата звернення: 01 серпня 2025).
 - [25] Difference Between Flexor and Extensor Muscles. URL: <https://testbook.com/key-differences/difference-between-flexor-and-extensor-muscles> (дата звернення: 01 серпня 2025).
 - [26] A muscle for bending a body part. URL: https://bereg-bud.com/myaz-dlya-zginannya-chastini-tila/#google_vignette (дата звернення: 01 серпня 2025).
 - [27] Вінничук С. М. Судинні захворювання головного та спинного мозку. Київ : Наукова думка, 1999. 114 с.
 - [28] Vovk M. I., Kutsyak O. A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2019. Vol. 198(4). Pp. 62-77. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt198.04.062>.
 - [29] Vovk M. I., Kutsyak O. A. Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2020. Vol. 201(3). Pp. 87-99. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt201.03.087>.
 - [30] Ashworth Scale / Modified Ashworth Scale. Rehabilitation Measures Database. URL: <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/ashworth-scale-modified-ashworth-scale> (дата звернення: 01 серпня 2025).
 - [31] Vovk M. I., Kutsyak O. A. AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021. Vol. 2(204). Pp. 84-100. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.084>.

INFORMATION SYSTEM FOR DIAGNOSING MOTOR ACTIVITY «MTEST» DESIGN

Kutsiak O.A.	PhD (Engineering), head of the department, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2277-7411 , e-mail: spirotech85@ukr.net ;
Pezentsali H.O.	PhD (Engineering), senior research fellow, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6319-6993 , e-mail: annp.irtc@gmail.com ;
Krishchanovych M.Yu.	lead engineer, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0032-7698 , e-mail: tornhold@gmail.com

Introduction. The causes of motor activity impairment/loss can be both central and peripheral disorders, in particular injuries, traumas and paresis of various genesis. Full rehabilitation of motor activity is associated with the mobilization of the body's reserves for its recovery, adequate to the patient's condition. Solving the problem of motor activity recovery is associated with the use of its diagnostics at all stages of rehabilitation. The purpose of the paper is to adapt the developed methodology of quantitative assessment of motor activity for peripheral lesion and designing its technical implementation as an information system for motor activity diagnosing «MTest». **Results.** The work describes the developed method for quantitative assessment of motor activity, adapted to peripheral lesions, on the basis of which the digital means of its diagnosis were created. The structural and functional diagram, a program algorithm for motor activity diagnosing, and UML activity diagrams in the «MTest» software system were developed. Modeling, preliminary laboratory and clinical testing of this software system confirmed the effectiveness of the proposed solutions and the feasibility of their application in clinical practice. **Conclusions.** The significance of obtained results lies in creating the basis for the creation of modern information technologies of digital medicine, aimed at increasing the efficiency of human motor activity recovery, personalizing treatment and integrating elements of artificial intelligence into medical decision-making. The social significance of the developed approaches lies in increasing the effectiveness of rehabilitation in the case of peripheral lesions, which is of particular relevance in the context of war and post-war realities.

Keywords: motor activity, information support, diagnostics, models, algorithms, software systems, information system, information technology.

References

- [1] M.I. Vovk, A.A. Kutsyak, A.D. Lauta, and M.A. Ovcharenko, "Informatsiyni suprovid doslidzhen dynamiky vidnovlennia rukhiv pislia insultu" ["Information Support of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke"], *Cybernetics and Computer Engineering*, vol. 189(3), pp. 61-78, 2017. doi: **10.15407/kvt189.03.061**. (Ukr.)
- [2] J.L. Adams et al., Digital Technology in Movement Disorders: Updates, Applications, and Challenges. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, vol. 21, article 16, 2021. doi: **10.1007/s11910-021-01101-6**.
- [3] F. Corona, "Quantitative assessment of upper limb motor impairments in people with neurological diseases," Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Cagliari, 2018.
- [4] D. Kushida, "Motor function diagnosis apparatus and method, and program," Japan patent JP6433805B2, Dec. 05, 2018.
- [5] B. Pan, Zh. Huang, T. Jin, J. Wu, Zh. Zhang, and Ya. Shen, "Motor Function Assessment of Upper Limb in Stroke Patients," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2021 (1), article 6621950, 2021. doi: **10.1155/2021/6621950**.
- [6] P. Maceira-Elvira, T. Popa, and A-C. Schmid, "Wearable technology in stroke rehabilitation: towards improved diagnosis and treatment of upper-limb motor impairment," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 16, article 142, 2019. doi: **10.1186/s12984-019-0612-y**.
- [7] N. Jalloul, "Wearable sensors for the monitoring of movement disorders," *Biomedical journal*, vol. 41, pp. 249-253, 2018. doi: **10.1016/j.bj.2018.06.003**.
- [8] F. Horak et al., "Movement monitoring system and apparatus for objective assessment of movement disorders," U.S. patent US2011/0213278A1, Sept. 01, 2011.
- [9] T. Paternostro-Sluga et al., "Reliability and validity of the Medical Research Council (MRC) scale and a modified scale for testing muscle strength in patients with radial palsy," *Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 40(8), pp. 665-671, 2008. doi: **10.2340/16501977-0235**.
- [10] N. Reese, and W. Bandy, *Joint range of motion and muscle length testing*. Elsevier Health Sciences, 2010.
- [11] J.M. McGowen, C.W. Hoppes, J.S. Forsse, S.R. Albin, J. Abt, and S.L. Koppenhaver, "The Utility of Myotonometry in Musculoskeletal Rehabilitation and Human Performance Programming," *Journal of Athletic Training*, vol. 58(4), pp. 305-318, 2023. doi: **10.4085/616.21**.
- [12] A. Van de Winckel, H. Feys, N. Lincoln, and W. De

- Weerdt, "Assessment of arm function in stroke patients: Rivermead Motor Assessment arm section revised with Rasch analysis," *Clinical Rehabilitation*, vol. 2(5), pp. 471-479, 2007. doi: **10.1177/0269215507071783**.
- [13] C. Collin, and D. Wade, "Assessing motor impairment after stroke: a pilot reliability study," *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, vol. 53 (7), pp. 576-579, 1990. doi: **10.1136/jnnp.53.7.576**.
- [14] D.J. Gladstone, C.J. Danells, and S.E. Black, "The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties," *Neurorehabil Neural Repair*, vol. 16(3), pp. 232-240, 2002. doi: **10.1177/154596802401105171**.
- [15] J.D. Schaechter et al., "Motor Recovery and Cortical Reorganization after Constraint-Induced Movement Therapy in Stroke Patients: A Preliminary Study," *Neurorehabilitation and Neural Repair*, vol. 16(4), pp. 326-338, 2002. doi: **10.1177/154596830201600403**.
- [16] N. Chino, S. Sonoda, K. Domen, E. Saitoh, and A. Kimura, "Stroke Impairment Assessment Set (SIAS)," *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, Vol. 31(2), pp. 119-125, 1994. doi: **10.2490/jjrm.31.119**.
- [17] K. Miyata, S. Tamura, S. Kobayashi, R. Takeda, and H. Iwamoto, "Balance Scale is a Valid Measure for Plan Interventions and for Assessing Changes in Postural Balance in Patients with Stroke," *Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 54, 2022. doi: **10.2340/jrm.v54.4443**.
- [18] A. Homola, "Methods of examination in physical therapy, and occupational therapy of people after stroke (clinical case)," *Ukrainian Scientific Medical Youth Journal*, iss. 1(144), pp. 151-161, 2024. doi: **10.32345/USMYJ.1(144).2024.151-161**.
- [19] T. Jarm, P. Kramar, and A. Županič, "Rating Stroke Patients Based on Movement Analysis," in *Proc. of the 11th Mediterranean Conf. on Medical and Biomedical Engineering and Computing*, Ljubljana, Slovenia, June 26-30, 2007, pp. 266-269. doi: **10.1007/978-3-540-73044-6_66**.
- [20] E.V. Olesh, S. Yakovenko, and V. Gritsenko, "Automated Assessment of Upper Extremity Movement Impairment due to Stroke," *Plos One*, vol. 9(8), article e104487, 2014. doi: **10.1371/journal.pone.0104487**.
- [21] L. Panella, A. Buizza, R. Lombardi, G. Beltrami, and R. Gandolfi, "A motor function test system," IT patent WO2005/039412A1, May 06, 2005.
- [22] A.S. Ahuja, "The impact of artificial intelligence in medicine on the future role of the physician," *PeerJ*, vol. 7, article e7702, 2019. doi: **10.7717/peerj.7702**.
- [23] V.H. Buch, I. Ahmed, and M. Maruthappu, "Artificial intelligence in medicine: current trends and future possibilities," *British Journal of General Practice*, vol. 68 (668), pp. 143-144, 2018. doi: **10.3399/bjgp18X695213**.
- [24] Extensor Muscles vs. Flexor Muscles. What's the Difference? [Online]. Available: <https://thisvsthat.io/extensor-muscles-vs-flexor-muscles>. Accessed on: August 01, 2025.
- [25] Difference Between Flexor and Extensor Muscles. [Online]. Available: <https://testbook.com/key-differences/difference-between-flexor-and-extensor-muscles>. Accessed on: August 01, 2025.
- [26] A muscle for bending a body part. [Online]. Available: https://beregbud.com/myaz-dlya-zginannya-chastinita/#google_vignette. Accessed on: August 01, 2025.
- [27] S.M. Vinnychuk, *Sudynni zakhvoriuvannia holovnoho ta spyynnoho mozku* [Vascular diseases of the brain and spinal cord]. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 1999. (Ukr.)
- [28] M.I. Vovk, and O.A. Kutsyak, "Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke," *Cybernetics and Computer Engineering*, vol. 198(4), pp. 62-77, 2019. doi: **10.15407/kvt198.04.062**.
- [29] M.I. Vovk, and O.A. Kutsyak, "Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke," *Cybernetics and Computer Engineering*, vol. 201(3), pp. 87-99, 2020. doi: **10.15407/kvt201.03.087**.
- [30] Ashworth Scale / Modified Ashworth Scale. Rehab-Measures Database. [Online]. Available: <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/ashworth-scale-modified-ashworth-scale>. Accessed on: August 01, 2025.
- [31] M.I. Vovk, and O.A. Kutsyak, "AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke," *Cybernetics and Computer Engineering*, vol. 2 (204), pp. 84-100, 2021. doi: **10.15407/kvt204.02.084**.

Стаття надійшла 10.11.2025

Стаття прийнята 30.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Куцяк О. А., Пезенцалі Г. О., Кріщанович М. Ю. Проектування інформаційної системи діагностування рухової активності «МТест». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 64-74. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350993>.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕНЕРАЦІЇ МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ДЛЯ ЗАДАЧ КІБЕРБЕЗПЕКИ

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;

Рейжевський М.І.

магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8212-0111>, e-mail: regevsky03@gmail.com

У статті досліджено проблему формування якісних навчальних вибірок для задач виявлення кіберзагроз у комп'ютерних мережах, що є критично важливою складовою для подальшого ефективного застосування методів машинного навчання. Проаналізовано сучасні підходи до моніторингу мережевого трафіку, класифікації кібератак та використання інтелектуальних систем виявлення вторгнень. Показано, що використання виключно реального мережевого трафіку суттєво ускладнює процес навчання моделей через обмежений доступ до даних, їх фрагментарність і дисбаланс класів. Запропоновано програмне рішення для генерації синтетичного мережевого трафіку, яке дозволяє моделювати як нормальну мережеву активність, так і різні типи кібератак. Розроблено програмне забезпечення надає автоматизований конвеєр створення датасетів із можливістю масштабування, маркування даних та збереження результатів у стандартних форматах для подальшого використання в алгоритмах машинного навчання. Реалізовано підтримку 13 типів мережевих атак, що охоплюють найбільш поширені сучасні загрози. Особливу увагу приділено математичній моделі підготовки даних, яка включає нормалізацію ознак, поділ вибірки на тренувальну, валідаційну та тестову підмножини, використання k -кратної перекресної перевірки та механізм ін'єкції синтетичних аномалій для усунення дисбалансу класів. Такий підхід дозволяє підвищити узагальнюючу здатність моделей і забезпечити об'єктивну оцінку їх ефективності. Експериментальні результати підтверджують коректність роботи розробленого програмного забезпечення та достатній обсяг і варіативність згенерованих даних. Отримані датасети можуть бути використані для навчання, тестування та порівняння моделей машинного навчання в задачах інтелектуального моніторингу трафіку та виявлення кіберзагроз, що визначає практичну цінність запропонованого підходу.

Ключові слова: кіберзагрози, генерація мережевого трафіку, програмне забезпечення, виявлення аномалій, машинне навчання.

Постановка проблеми

Сучасний світ дедалі більше переходить у цифровий формат: бізнес, освіта, медицина та навіть особисте спілкування активно здійснюються онлайн, у мережі Інтернет. Як і у фізичному просторі, у віртуальному середовищі також існують злочинці, які намагаються скористатися вразливістю користувачів чи систем. У результаті питання захисту інформації від кібершахраїв, здатних викрадати цифрові дані, набуває все більшої актуальності та стає одним із ключових викликів нашого часу.

Кібератаки посідають важливе місце у сучасному інформаційному суспільстві. Вони стали одним із ключових викликів для держав, бізнесу та окремих користувачів, оскільки безпека даних напряму залежить від ефективності захисту інформаційних систем [1].

Кожна країна світу стикається з проблемами кіберзлочинності та витрачає значні ресурси на забезпечення кібербезпеки. Хакерські угруповання, використовуючи вразливості програмного забезпечення та соціальну інженерію, здійснюють атаки з метою отримання фінансової вигоди, викрадення даних або порушення роботи критично важливої інфраструктури. Такі атаки стають інструментом як економічного тиску, так і політичної боротьби у глобальному масштабі.

Одним із ключових аспектів вивчення кібербезпеки є аналіз трафіку. Мережевий трафік [2]

відображає всі процеси обміну даними між користувачами, серверами та різними пристроями. Саме у трафіку можна виявити шкідливу активність, аномалії або ознаки атак. Трафік ділиться на вхідний та вихідний, і для кожного з них використовуються методи моніторингу, фільтрації та шифрування. Сучасні системи аналізу трафіку (наприклад, IDS/IPS) дозволяють автоматично визначати підозрілу активність і блокувати потенційні загрози.

Існує велика кількість типів кібератак серед найпоширеніших можна виділити [3]:

DDoS-атаки – перевантаження серверів великою кількістю запитів з метою вивести ресурс з ладу;

Фішинг – викрадення особистих даних користувачів через підроблені сайти чи електронні листи;

Вірусні атаки та шкідливе ПЗ – зараження системи програмами, які викрадають інформацію або знищують дані;

SQL-ін'єкції – спроби отримати доступ до баз даних шляхом вставки шкідливих запитів;

Атаки нулевого дня – використання ще невідомих вразливостей у програмному забезпеченні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Збільшення числа комп'ютерних інцидентів, пов'язаних із зовнішнім втручанням у роботу системи, спонукало дослідників до розробки системи

своєчасного втручання. Сьогодні такі системи стали необхідним компонентом інфраструктури безпеки організацій, виявлення і передумання також є складовою повної роботи фахівців з кібербезпеки. Дана стаття [4] присвячена дослідженню технологій комп'ютерних атак, огляду системи виявлення вторгнень, методів аналізу виявлених атак, системи запобігання вторгнень. Авторами наведено і проаналізовано класифікацію, компоненти і архітектуру системи IDS. Запропоновано підходи до захисту комп'ютерної мережі на базі виявлення системи вторгнення.

Розробка інформаційних технологій виявлення атак є актуальною задачею. Наприклад, у статті [5] розглянуто інформаційну технологію інтелектуального моніторингу трафіку комп'ютерних мереж для виявлення атак та аномальної поведінки. Проаналізовано сучасні підходи до моніторингу мережевого трафіку, методи виявлення аномалій і застосування машинного навчання для аналізу та розвитку алгоритмів виявлення загроз. Здійснено класифікацію систем інтелектуального моніторингу, наведено порівняльну характеристику їх переваг і недоліків та окреслено перспективи підвищення ефективності виявлення мережеских атак.

Віддалений доступ та передача даних роблять мережі вразливими до різних загроз. Таким чином, мережева безпека є важливою для обміну даними та комунікації. У статті [6] наголошується на мережевій безпеці в IT-системах та розглядаються сучасні мережеві загрози та засоби захисту. Головна мета – запобігти доступу хакерів до захищених даних та забезпечити безпечний комунікаційний пристрій для споживачів.

Дослідження [7] присвячено використанню математичних методів, таких як теорія ймовірностей, теорія ігор, графові моделі та статистичні підходи для побудови моделей, що дозволяють відтворювати динаміку загроз у реальних мережах. Методологія базується на моделюванні різних сценаріїв атак, що впливають на інформаційну безпеку. Використання цих моделей дає змогу створювати точні алгоритми для запобігання атакам, що, у свою чергу, забезпечує надійність та безпеку мережевої інфраструктури. Це дослідження надає унікальну можливість глибше зрозуміти природу кібератак, що робить його цінним ресурсом для фахівців з безпеки.

В роботі [8] розроблено метод генерації зразків мережеских атак на основі глибоких згорткових генеративно-змагальних мереж (DCGAN) та метод захисту від змагальних зразків на основі багатомасштабних GAN, а також виконується перевірка практичності цих двох методів за допомогою експериментів. Наведено порівняння трьох методів генерації змагальних зразків: AE-CDA, AE-DEEP та AE-ATTACK, метод генерації змагальних зразків на основі DCGAN у цій статті може ефективніше впливати на функцію виявлення моделі виявлення аномалій, має кращу стабільність та універсальність, а також може підтримувати відносно

стабільний ефект атаки на широкому діапазоні моделей та наборів даних.

Робота [9] є цікавим оглядом досліджень мережевої безпеки, класифікації різних атак та загроз, а також заходів, які необхідно впровадити для захисту. У статті також описано різні концепції, пов'язані з безпекою, включаючи мережеву безпеку, криптографію та шифрування.

Робота [10] присвячена питанню бездротових мереж, що стали невід'ємною частиною повсякденного життя, забезпечуючи підключення для широкого кола пристроїв. Однак, зі зростанням використання бездротових мереж, безпека стала серйозною проблемою. Атаки можуть призвести до втрати конфіденційності, цілісності та доступності мережеских ресурсів. Тому в цьому дослідженні досліджувалися вразливості та проблеми, пов'язані з MAC-адресами, підміною DHCP та несанкціонованими атаками SSH. Аналіз рішення для запобігання та пом'якшення цих атак було проведено за допомогою мережевого моделювання з використанням Cisco Packet Tracer Windows версії 8.1.1. Проект системи мав забезпечити зручний інтерфейс для мережеских адміністраторів для моніторингу своїх мереж та перевірки наявності аномалій.

В роботі [11] проводиться порівняльний аналіз системи виявлення атак та запобігання вторгненням. Наукова новизна дослідження досягнута у визначенні ефективності розробленої системи шляхом вирішення завдань багатокритеріального прийняття рішень. У роботі виконується декомпозиція задачі прийняття рішень із виділенням головної цілі та альтернативою з використанням методу Сааті. Результати проведеного аналізу підтверджують, що розроблена система є ефективною та актуальною.

Огляд розширених типів мережеских атак є доцільним дослідженням, що приведено в роботі [12]. Для кожного типу атаки описано джерела та об'єкти атаки, мету та результати атаки, дії, що застосовуються для досягнення мети атаки. Визначено умови можливості здійснення кожного типу атаки. На базі знайдених відомостей зібрано та класифіковано чинники, які дозволяють успішно виконати атаки. Окреслено напрями посилення стійкості до мережеских атак.

У зв'язку з тим, що навчання моделей на реальному трафіку є проблемною задачею, питання створення застосунку для генерації вибірки де є різні типи погроз для мережі є актуальним питанням. Для подальшого навчання моделей машинного навчання необхідно мати якісну вибірку, щоб підвищити якість розпізнавання кібер погроз. Аналіз літератури показав, що створення якісного матеріалу для навчання моделей є перспективним завданням.

Мета статті

Розробка програмного рішення, яке забезпечить генерацію різного типу трафіку, що включає кібератаки та нормальний трафік для створення вибірки

даних. Отримана вибірка в подальшому буде використовуватися для навчання на моделях машинного навчання для виявлення кіберзагроз.

Виклад основного матеріалу

У поставленій задачі важливим етапом є формування якісних навчальних вибірок, оскільки саме від їх структури залежить ефективність моделей машинного навчання. Дані для задачі виявлення аномалій, класифікації загроз та прогнозування активності можуть походити з різних джерел: журналів подій (logs), мережевих потоків (network flows), системних лічильників продуктивності, а також штучно згенерованих сценаріїв. Для підвищення надійності використовується комбінований підхід – реальні дані доповнюються синтетичними профілями «норми» та «аномалій».

Принцип розбиття загальної вибірки є важливим етапом, що включає в себе поділ вибірки на підмножини. Для навчання та перевірки якості моделей дані розділяються на тренувальну, валідаційну та тестову підмножини. Це дозволяє уникнути перенавчання та оцінити узагальнюючу здатність алгоритму:

$$X_{train}, Y_{train}, X_{test}, Y_{test}, X_{val}, Y_{val} = \text{split}(X, y, \text{test_size} = \alpha), \quad (1)$$

де X – матриця ознак,

Y – вектор класів (норма/аномалія),

α – частка тестової вибірки (зазвичай 0.2–0.3),

y – вектор цільових значень (labels), наприклад, класи «норма» / «аномалія»,

X_{train}, Y_{train} – підмножина даних, що використовується для навчання моделі,

X_{val}, Y_{val} – валідаційна вибірка, яка використовується для налаштування параметрів моделі й запобігання перенавчанню,

X_{test}, Y_{test} – тестова вибірка, застосовується для фінальної перевірки якості після навчання.

Для більш надійної оцінки використовується метод k -кратної перехресної перевірки. Вибірka розбивається на k підмножин і кожна з них послідовно виступає як тестова. Остаточна оцінка моделі визначається як середнє значення по всіх ітераціях:

$$CV = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \text{Score}_j, \quad (2)$$

де Score_j – значення метрики на j -тій ітерації.

Для покращення якості навчання моделей, виявлення відхилень передбачено етап генерації синтетичних аномалій. Цей етап дозволяє доповнити наявний набір даних штучно створеними прикладами рідкісних подій, що імітують потенційні аномалії у реальному середовищі. Такий підхід забезпечує більш збалансований розподіл класів та підвищує здатність алгоритму розпізнавати нетипові ситуації. Оскільки дані в реальних системах часто мають дисбаланс (аномалії

зустрічаються рідко), вводиться механізм ін'єкції синтетичних прикладів. Вони формуються на основі відхилень у багатовимірному просторі ознак, що дозволяє контролювати частку позитивного класу P_{pos} і складність задачі:

$$D_{aug} = D_{real} = D_{synthetic}(P_{pos}, \delta), \quad (3)$$

де D_{real} – реальні дані,

$D_{synthetic}$ – згенеровані точки з відхиленням δ ,

P_{pos} – бажана частка позитивного класу.

Оскільки різні ознаки мають різний розмір, то доцільним є використання нормалізації. Нормалізація (або стандартизація) дозволяє привести всі вхідні параметри до єдиної шкали, що особливо важливо при роботі з алгоритмами, чутливими до масштабів ознак. Формула нормалізації має наступний вигляд:

$$X_{norm} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (4)$$

де x – початкове значення ознаки;

μ – середнє значення ознаки у вибірці,

σ – стандартне відхилення.

Таким чином, побудована математична модель підготовки даних охоплює ключові етапи: стандартизацію ознак, поділ на підмножини, використання крос-валідації та ін'єкцію синтетичних аномалій. Це забезпечує збалансовану навчальну базу та створює умови для об'єктивної оцінки алгоритмів машинного навчання в задачах виявлення загроз у комп'ютерних мережах.

Розроблена математична модель лягла в основу першої частини системи виявлення аномалій, а саме генерації трафіку.

Система моніторингу та виявлення аномалій реалізована у вигляді системи з веб-інтерфейсом [13], що забезпечує зручність доступу, мобільність використання та можливість віддаленого контролю стану комп'ютерної мережі.

Методологія генерації трафіку включає в себе наступні етапи: визначення типу запису, генерація даних, додавання ML-ознак, маркування, збереження у форматі CSV.

Інтерфейс розробленої першої частини системи моніторингу та виявлення аномалій у комп'ютерних мережах представлено на рисунку 1.

Користувач вибирає потрібні параметри для генерування маркованих і немаркованих даних сетів.

За замовчуванням тривалість генерації вибірки складає 30 хвилин, швидкість генерації приблизно 100 пакетів в секунду. Для створення реалістичних даних частота атак складає 5 атак за хвилину. Тобто загальна кількість при генерації за замовченням близько 180 000

При цьому розподіл трафіку має наступний вигляд: нормальний трафік – 70% ($\approx 126\,000$ записів); атаки – 20% ($\approx 36\,000$ записів); атакований трафік – 10% ($\approx 18\,000$ записів).

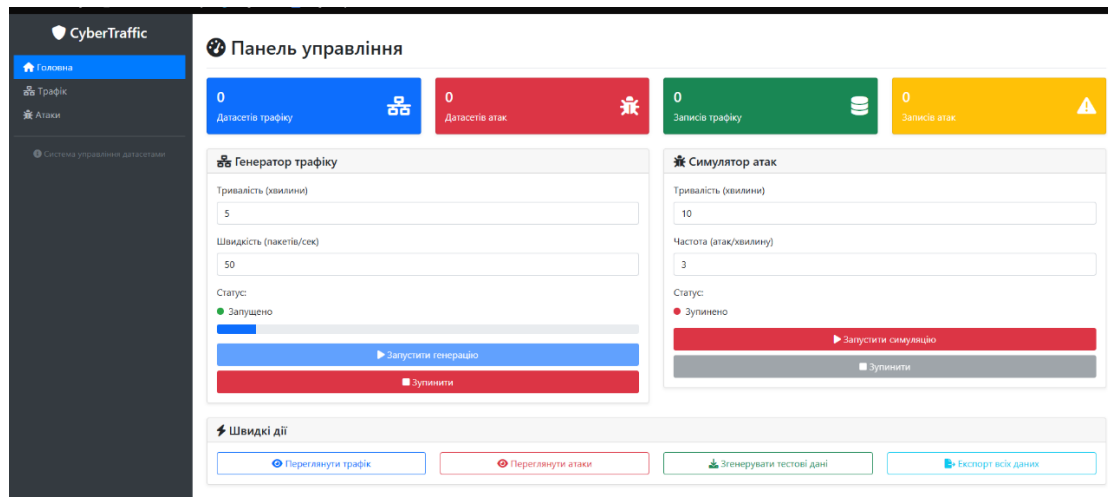


Рис. 1 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення з генерації трафіку

Розроблене програмне забезпечення дозволяє виконувати масштабованість вибірок. Так малі датасети: 1-5 хвилин (6 000-30 000 записів); середні датасети: 10-30 хвилин (60 000-180 000 записів); великі датасети: понад 60 хвилин (360 000+ записів).

Отримана вибірка (датасет) має макровану частину, що використовується для навчання моделей машинного навчання, та немаркований датасет, який застосовується для тестування.

В програмному забезпеченні генерації підтримується генерація 13 типів кібератак, зокрема DDoS, Port Scan, SQL Injection, XSS, Brute Force, Malware, Phishing, Man-in-the-Middle, Buffer Overflow, Privilege Escalation, Data Exfiltration, Ransomware та Unknown [9].

Атакований трафік має свої особливості, що були виявлені при дослідженні результатів генерації, а саме

менший розмір пакетів, обмежений набір протоколів, низький TTL, підозрілі TCP прапори.

Оскільки генерація трафіка включає в себе не лише атакований трафік, а ще й нормальний трафік, тому реалізовано характеристики нормального трафіку: протоколи: TCP, UDP, ICMP, HTTP, HTTPS, DNS, FTP, SSH. Розмір пакетів: 64-1500 байт. TTL: 32-255. TCP прапори: SYN, ACK, FIN, RST, PSH, URG.

Для забезпечення якості та варіативності даних, процес створення навчальних вибірок був автоматизований. Розроблений конвеєр (pipeline) генерації атак дозволяє моделювати різні сценарії загроз, такі як DoS, SQL-ін'єкції, XSS та Brute Force, з подальшим маркуванням даних для навчання моделей. Схема потоку генерації вибірки атак та приклади команд для запуску симуляції наведені на рисунку 2.

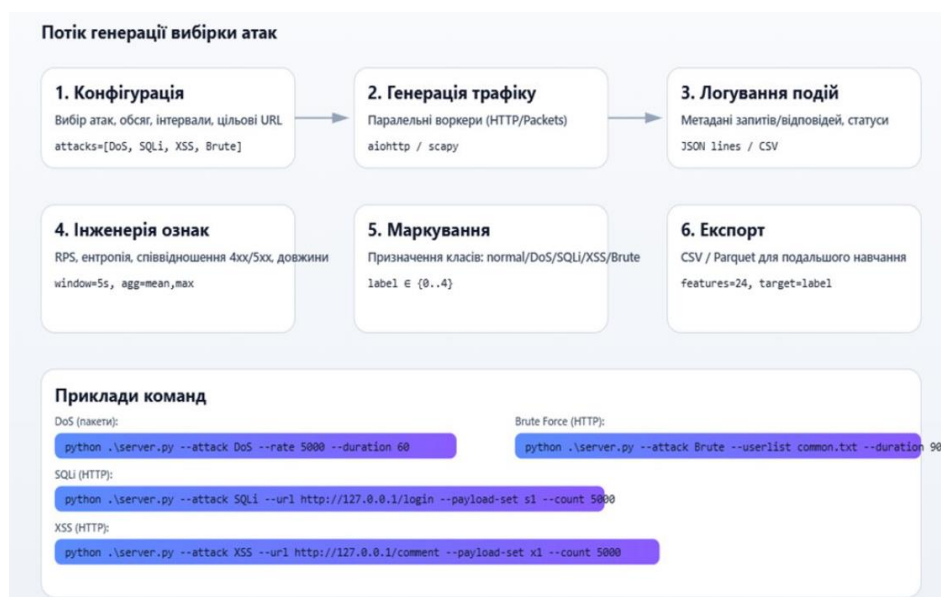


Рис. 2 – Схема потоку генерації синтетичної вибірки атак та приклади скриптів запуску

Як видно зі схеми на рисунку 2, процес складається з шести етапів: від конфігурації параметрів атаки до експорту готового файлу у форматі CSV або Parquet. Важливим етапом є «Інженерія ознак», де розраховуються статистичні показники (наприклад, ентропія, RPS), які є критичними для коректної роботи алгоритмів машинного навчання. Використання скриптів (server.py) дозволяє гнучко налаштувати тривалість та інтенсивність атак.

Для перевірки отриманих результатів було виконано експериментальне дослідження, в якому відбувалась генерація трафіку. Кожен раз трафік генерується по різному, що дозволяє робити різні набори вибірок. Приклад розподілу загроз для навчальної та тестової вибірки наведено в таблиці 1. Також в програмному забезпеченні можна зробити розподіл за типами даних та розподіл за наявністю міток та загроз.

Таблиця 1

Розподіл загроз для навчального та тестувального датасетів

Тип загрози	Навчальний датасет	% від навч.	Тест (з мітками)	% від тесту (з мітками)	Тест (без міток)	% від тесту (без міток)	Всього	% від загалу
	4970	100	4975	100	4962	100	14907	100
Нормальний трафік	3,482	70,06	3,441	69,17	2,479	49,96	9,402	63,07
Атакований трафік	474	9,54	564	11,34	0	0	1,038	6,96
Brute_Force	87	1,75	86	1,73	212	4,27	385	2,58
Buffer_Overflow	95	1,91	84	1,69	194	3,91	373	2,50
DDoS	70	1,41	90	1,81	232	4,68	392	2,63
Data_Exfiltration	82	1,65	91	1,83	187	3,77	360	2,41
Malware	95	1,91	73	1,47	212	4,27	380	2,55
Man_in_the_Middle	84	1,69	71	1,43	212	4,27	367	2,46
Phishing	93	1,87	64	1,29	197	3,97	354	2,37
Port_Scan	91	1,83	84	1,69	210	4,23	385	2,58
Privilege_Escalation	78	1,57	87	1,75	189	3,81	354	2,37
Ransomware	81	1,63	84	1,69	224	4,51	389	2,61
SQL_Injection	78	1,57	74	1,49	195	3,93	347	2,33
XSS	80	1,61	82	1,65	219	4,41	381	2,56
	Всього загроз: 1488	29,94	Всього загроз: 1534	30,83	Всього загроз: 2483	50,04	Всього загроз: 5505	36,93

Аналіз структури згенерованих даних дозволяє виявити кілька важливих закономірностей, що підтверджують ефективність обраного підходу. По-перше, у навчальному датасеті дотримано балансу між легітимним трафіком (70,06%) та атаками (29,94%). Це дозволить моделям машинного навчання ефективно вивчати ознаки «норми», маючи при цьому достатню кількість

прикладів для кожного з 12 типів загроз. Зокрема, рівномірний розподіл таких складних атак, як SQL Injection (1,57%), Ransomware (1,63%) та Privilege Escalation (1,57%), гарантує, що модель не буде ігнорувати рідкісні події через дисбаланс класів. По-друге, особливу цінність для тестування представляє набір даних без міток, де частка аномалій штучно збільшена до 50,04%.

Такий підхід дозволить перевірити стійкість алгоритмів до інтенсивних сплесків шкідливої активності, що часто спостерігається під час реальних кібератак. По-третє, категорія «Атакований трафік» (9,54% у навчальній вибірці) виступає в ролі сполучного елемента, описуючи стан системи під час перебігу атаки, що є критично важливим для мінімізації помилок другого роду (пропущених атак). Таким чином, розроблений програмний продукт не просто генерує випадкові пакети, а створює структуроване середовище даних, яке відповідає математичній моделі підготовки вибірок (стандартизація, ін'єкція аномалій та кросвалідація). Це забезпечує високу узагальнюючу здатність майбутніх систем виявлення вторгнень та підтверджує практичну цінність запропонованого конвеєра генерації.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що розроблений програмний продукт для генерації трафіку працює коректно. Отримані результати є достатньо об'ємними, щоб можна було в подальшому використовувати їх для навчання моделей машинного навчання визначення кіберзагроз.

Висновки

У ході виконання роботи проаналізовано сучасний стан проблеми кібербезпеки та виявлення мережових атак, зокрема роль аналізу мережевого трафіку як одного з ключових джерел інформації про шкідливу активність. Проведений огляд наукових публікацій показав, що ефективність інтелектуальних систем виявлення загроз значною мірою залежить від якості та репрезентативності навчальних вибірок.

Розроблено математичну модель підготовки даних для задач машинного навчання, яка охоплює основні етапи формування вибірок: нормалізацію ознак, поділ на підмножини, використання крос-валідації та генерацію синтетичних аномалій. Запропонований підхід дозволяє усунути проблему дисбалансу класів і підвищити здатність моделей розпізнавати рідкісні та нетипові мережеві події.

Створено програмне забезпечення для генерації мережевого трафіку з веб-інтерфейсом, яке підтримує моделювання нормального та атакованого трафіку, масштабування датасетів і генерацію різних типів кібератак. Реалізований конвеєр генерації забезпечує автоматизацію процесу створення навчальних і тестових вибірок, а також формування наборів із мітками та без міток для різних сценаріїв використання.

Експериментальні дослідження підтвердили коректність роботи розробленого програмного продукту та відповідність розподілу згенерованих даних заданим параметрам. Отримані результати свідчать про доцільність використання запропонованої системи для підготовки даних у задачах навчання моделей машинного навчання з виявлення кіберзагроз, а також визначають перспективи подальшого розвитку системи в напрямі інтеграції з інтелектуальними засобами моніторингу комп'ютерних мереж.

Перелік використаних джерел

- [1] Steinberg J. Cybersecurity For Dummies. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc., 2019. 368 p.
- [2] Bhuyan M. H., Bhattacharyya D. K., Kalita J. K. Network Traffic Anomaly Detection and Prevention: Concepts, Techniques, and Tools. Springer Cham, 2017. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65188-0>.
- [3] Likhith G., Ali J., Vidyashree R. Detection of Cyber Attacks using Artificial Intelligence. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2025. Vol. 14, iss. 5. Pp. 13863-13871. DOI: <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2025.1405370>.
- [4] Пашпорін В. І., Кравчук П. Ю., Крайчак Є. В. Застосування систем виявлення вторгнень для захисту комп'ютерних мереж. *Збірник наукових праць Європейського університету*. 2023. С. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.36919/978-966-301-266-7/1.2024.89>.
- [5] Hasan M., Khan R. Network threats, attacks and security measures: a review. *International Journal of Advanced Computer Research*. 2017. Vol. 9. Pp. 116-120. DOI: <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i9.4641>.
- [6] Dwivedi A. K., Dwivedi M., Kumar M. Advances in network security: a comprehensive analysis of measures, threats, and future research directions. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2023. Vol. 10, iss. 7. Pp. g64-g69.
- [7] Doroshenko D. Prediction of Network Threats and Attacks by Mathematical Simulation. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2024. Vol. 3. Pp. 173-179.
- [8] Shan J., Ma H., Li J. Research on Network Attack Sample Generation and Defence Techniques Based on Generative Adversarial Networks. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024. Vol. 9, iss. 1. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.2478/amns-2024-3550>.
- [9] Najem D. F., Kareem S. M. A review on cyber security and cyber attacks. *Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics*. 2025. Vol. 17, no. 2. Pp. 153-161. DOI: <https://doi.org/10.29304/jqcsms.2025.17.22195>.
- [10] Security analysis in wireless networks / Rahim M., Jimada-Ojuolape B., Omolara M., Adesina L. *Caliphate Journal of Science and Technology*. 2025. Vol. 7. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.4314/cajost.v7i1.01>.
- [11] Гринченко П. Дослідження розробленої системи виявлення мережових атак (CBMA) із використанням MAI. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. № 2. Pp. 25-33. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-4>.
- [12] Годлевський О. Б., Мороховець М. К., Щоголева Н. М. Аналіз поширених типів мережових атак та чинники, що уможливають їх успішне здійснення. *Information Technologies and Systems*.

2025. No. 2(2). Pp. 55-80. DOI: <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.02.055>.

- [13] Perdana F., Supratman E., Saputra D. Designing a Modern Web Interface with Vue.js and Tailwind for

University Information System. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 4. Pp. 956-963. DOI: <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i2.5409>.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR NETWORK TRAFFIC GENERATION IN COMPUTER NETWORKS FOR CYBERSECURITY TASKS

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;

Reizhevskiy M.I.

M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8212-0111>, e-mail: regevsky03@gmail.com

The article investigates the problem of forming high-quality training samples for cyber threat detection tasks in computer networks, which is a critically important component in the further effective application of machine learning methods. Modern approaches to monitoring network traffic, classifying cyber attacks, and using intelligent intrusion detection systems are analyzed. It is shown that using only real network traffic significantly complicates the process of training models due to limited access to data, its fragmentation, and class imbalance. A software solution is proposed for generating synthetic network traffic, which allows modeling both normal network activity and various types of cyber attacks. The software developed provides an automated pipeline for creating datasets with the ability to scale, label data, and save results in standard formats for further use in machine learning algorithms. Support for 13 types of network attacks, covering the most common modern threats, is implemented. Particular attention is paid to the mathematical model of data preparation, which includes feature normalization, sample division into training, validation and test subsets, the use of k-fold cross-validation and the mechanism of injection of synthetic anomalies to eliminate class imbalance. This approach allows to increase the generalization ability of models and provide an objective assessment of their effectiveness. Experimental results confirm the correctness of the work of the developed software and the sufficient volume and variability of the generated data. The obtained datasets can be used for training, testing and comparison of machine learning models in the tasks of intelligent traffic monitoring and cyber threat detection, which determines the practical value of the proposed approach.

Keywords: cyber threats, network traffic generation, software, anomaly detection, machine learning.

References

- [1] J. Steinberg, *Cybersecurity For Dummies*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc., 2019.
- [2] M.H. Bhuyan, D.K. Bhattacharyya, and J.K. Kalita, *Network Traffic Anomaly Detection and Prevention: Concepts, Techniques, and Tools*. Springer Cham Publ., 2017. doi: 10.1007/978-3-319-65188-0.
- [3] G. Likhith, J. Ali, and R. Vidyashree, "Detection of Cyber Attacks using Artificial Intelligence," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 14, iss. 5, pp. 13863-13871, 2025. doi: 10.15680/IJIRSET.2025.1405370.
- [4] V.I. Pashorin, P.Yu. Kravchuk, and Ye.V. Kraichak, "Zastosuvannia system vyivlennia vtorhnen dlia zakhystu kompiuternykh merezh" ["Application of intrusion detection systems to protect computer networks"], *Zbirnyk naukovykh prats Yevropeiskoho universytetu – Collection of scientific papers of the European University*, pp. 89-99, 2023. doi: 10.36919/978-966-301-266-7/1.2024.89.
- [5] M. Hasan, and R. Khan, "Network threats, attacks and security measures: a review," *International Journal of Advanced Computer Research*, vol. 9, pp. 116-120, 2017. doi: 10.26483/ijarcs.v8i9.4641.
- [6] A.K. Dwivedi, M. Dwivedi, and M. Kumar, "Advances in network security: a comprehensive analysis of measures, threats, and future research directions," *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 10, iss. 7, pp. g64-g69, 2023.
- [7] D. Doroshenko, "Prediction of Network Threats and Attacks by Mathematical Simulation," *Challenges and Issues of Modern Science*, vol. 3, pp. 173-179, 2024.
- [8] J. Shan, H. Ma, and J. Li, "Research on Network Attack Sample Generation and Defence Techniques Based on Generative Adversarial Networks," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, iss. 1, pp. 1-20, 2024. doi: 10.2478/amns-2024-3550.
- [9] D.F. Najem, and S.M. Kareem, "A review on cyber security and cyber attacks," *Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics*, vol. 17, no. 2, pp. 153-161, 2025. doi: 10.29304/jqcs.2025.17.22195.
- [10] M. Rahim, B. Jimada-Ojuolape, M. Omolara, and L. Adesina, "Security analysis in wireless networks," *Caliphate Journal of Science and Technology*, vol. 7, pp. 1-11, 2025. doi: 10.4314/cajost.v7i1.01.

- [11] P. Hrynchenko, "Doslidzhennia rozrobliuvanoi systemy vyivlennia merezhevykh atak (SVMA) iz vykorystanniam MAI" ["Research of the network attacks detection system (NADS) under development using MAI"], *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, № 2, pp. 25-33, 2024. doi: **10.32782/IT/2024-2-4**.
- [12] A.B. Godlevsky, M.K. Morokhovets, and N.M. Shchogoleva, "Analiz poshyrenykh typiv merezhevykh atak ta chynnyky, shcho umozhlyvliuiut yikh uspishne zdiisnennia" ["Analysis of Common Types of Network Attacks, and Factors Enabling their Successful Implementation"], *Information Technologies and Systems*, no. 2(2), pp. 55-80, 2025. doi: **10.15407/intechsys.2025.02.055**.
- [13] F. Perdana, E. Supratman, and D. Saputra, "Designing a Modern Web Interface with Vue.js and Tailwind for University Information System," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, pp. 956-963, 2024. doi: **10.47709/brilliance.v4i2.5409**.
- Стаття надійшла 10.10.2025
Стаття прийнята 02.11.2025
Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Проніна О. І., Рейжевський М. І. Розробка програмного забезпечення генерації мережевого трафіку в комп'ютерних мережах для задач кібербезпеки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 75-82. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350996>.

ЗАХИСТ ДАНИХ І БЕЗПЕКА МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ
В РИНКОВО-НЕЙТРАЛЬНИХ СТРАТЕГІЯХ КРИПТОТРЕЙДИНГУ

Левицька Т.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3359-1313 , e-mail: levitskaya_t_a@pstu.edu ;
Копійка О.С.	студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4117-4899 , e-mail: kopiika_o_s@students.pstu.edu ;
Пилипенко Б.В.	студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4968-8190 , e-mail: pylypenko_b_v@pstu.edu

Криптовалютні ринки та алгоритмічний криптотрейдинг активно переходять до використання моделей глибинного навчання й ринково-нейтральних стратегій, що посилює вимоги до захисту даних і безпеки моделей. Стаття пропонує цілісний підхід до end-to-end захисту даних у хмарній системі алгоритмічного криптотрейдингу, яка реалізує ринково-нейтральні стратегії на основі моделей машинного навчання. Розглянуто криптографічні механізми протоколів Bitcoin та Ethereum і їхній внесок у забезпечення цілісності, незаперечності та стійкості транзакцій до повторного відтворення. Проаналізовано типові загрози DeFi-протоколів та біржових API, зокрема реентрантні атаки, маніпуляції оракулами, flash-кредити, MEV-атаки та зловживання API-ключами. Систематизовано патерни захисту даних і секретів у хмарній інфраструктурі Azure, AWS і GCP з використанням служб керування ключами та секретами, шифрування даних у транзиті та на спокої, принципів мінімальних привілеїв і сегментації мережі. Окрему увагу приділено загрозам для моделей машинного навчання у задачах прогнозування фінансових часових рядів, включно з отруєнням даних, адверсаріальними впливами та витоком моделей, а також їхньому зв'язку з вимогами регуляторів до алгоритмічного трейдингу й фреймворком NIST AI RMF. На прикладі прототипу ринково-нейтральної системи криптотрейдингу на основі LSTM/GRU-моделей побудовано матрицю «загроза–мітигація» та запропоновано практичні рекомендації щодо архітектури захисту. Додатково наведено мініексперимент із HMAC-SHA256-підписом і часовим вікном для запитів до біржового API, що демонструє виявлення та блокування спроб повторного відтворення запитів.

Ключові слова: захист даних, криптотрейдинг, ринково-нейтральні стратегії, машинне навчання, глибинне навчання, хмарна інфраструктура, інформаційна безпека, DeFi, HMAC, kill-switch.

Постановка проблеми

Активний розвиток ринку криптовалют і децентралізованих фінансів призвів до появи великої кількості алгоритмічних торгових систем, які використовують глибинні нейронні мережі для прогнозування часових рядів цін та формування ринково-нейтральних стратегій. У більшості публікацій основна увага приділяється якості прогнозу та доходності портфеля, тоді як питання захисту даних і ключів у повному життєвому циклі системи розглядаються фрагментарно або взагалі ігноруються.

На практиці ML-стек алгоритмічного трейдингу працює з чутливими даними й обліковими даними: API-ключами централізованих і децентралізованих бірж, історією котирувань та ордерів, наборами ознак для навчання моделей, снапшотами натренованих моделей, журналами операцій і бек-тестів. Компрометація будь-якого з цих елементів, цілеспрямоване спотворення вхідних даних або захоплення моделі атаквальником можуть призвести до прямих фінансових втрат, порушення регуляторних вимог до управління ризиками алгоритмічного трейдингу та втрати довіри до системи.

Проблема полягає в тому, що відсутня цілісна методика проектування й експлуатації ML-орієнтованих криптовалютних торгових систем, у якій засоби

криптографічного захисту, хмарна інфраструктура управління секретами, протокольні механізми аутентифікації біржових API та практики безпеки моделей машинного навчання були б інтегровані в єдину архітектуру ринково-нейтральної стратегії з контрольованим ризиком. Саме заповненню цієї прогалини й присвячена стаття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У працях з прогнозування криптовалютних часових рядів переважають моделі глибинного навчання. Автори порівнюють моделі типу LSTM, GRU та двонапрямні LSTM за точністю прогнозу і показниками умовного трейдингу. Показано, що ці архітектури краще відтворюють нелінійні залежності й довгу пам'ять, ніж лінійні моделі, що зменшує похибку прогнозу і покращує прості стратегії купівлі-продажу [1]. При цьому джерела даних, цілісність часового ряду та модель загроз для самої моделі майже не аналізуються. Більшість робіт просто приймає, що вхідні дані коректні, а торгове середовище не є ворожим.

Криптографічні властивості протоколів Bitcoin і Ethereum опрацьовані набагато глибше. Оригінальні специфікації описують використання цифрових підписів на еліптичних кривих, побудову дерев Меркла та моделі обліку, які забезпечують незмінність журналу

транзакцій і зв'язок між витраченими та отриманими монетами [2-4]. Стандарти NIST і IETF для хеш-функцій, HMAC та протоколу TLS 1.3 визначають набір стійких примітивів для автентифікації й захисту трафіку у фінансових застосунках [5-8]. Це створює надійну базу для побудови безпечних каналів і підпису запитів до біржових API, однак питання інтеграції цих примітивів у повний ML-стек зазвичай залишається на розсуд розробника.

Дослідження DeFi та смарт-контрактів зосереджені на аналізі конкретних вразливостей і сценаріїв атак. Узагальнюючі огляди виділяють повторні виклики, помилки у валідації стану, небезпечні зовнішні виклики та слабкі механізми оновлення як основні джерела критичних помилок у смарт-контрактах Ethereum [9, 10]. Роботи з безпеки DeFi показують, що flash-кредити дають змогу атакувальнику швидко нарощувати позицію, змішувати ціни в оракулах та виводити кошти з протоколів, якщо цінові механізми побудовані на коротких вікнах спостереження [11, 12]. Аналіз MEV-активності демонструє, що доступ до упорядкування транзакцій у mempool дозволяє цілеспрямовано погіршувати ціну виконання заявок інших учасників через front-running та sandwich-атаки [13]. Для алгоритмічних стратегій це означає, що навіть коректний сигнал моделі може реалізовуватися на ринку зі стійким зсувом проти трейдера.

У сфері безпеки машинного навчання сформовано класи атак, які безпосередньо стосуються торгових моделей. Базові огляди виділяють отруєння навчальних вибірок, маніпуляції на етапі експлуатації через спеціально сконструйовані приклади, а також атаки на конфіденційність навчальних даних і параметрів моделі [14, 15]. Роботи щодо крадіжки моделей показують, що доступ до API прогнозування дозволяє відтворювати модель або її частину з достатньою точністю, щоб використовувати її логіку у власних стратегіях [16]. Атаки інверсії моделі демонструють можливість відновлення чутливих характеристик навчальних даних із вихідних ймовірностей [17]. Для фінансових моделей це створює два напрями ризику: спотворення сигналів через маніпуляцію даними і витік торгового ноу-хау через несекурні API та журнали.

Регуляторні органи описують безпеку алгоритмічного трейдингу з позицій ринкової стабільності та керованості. Стаття 17 MiFID II та звіти ESMA вимагають від учасників ринку наявності стрес-тестування алгоритмів, обмежень за обсягом і ціною ордерів, журналювання всіх рішень і можливості негайно припинити роботу алгоритму при збої [18, 19]. Документи НКМА та PRA конкретизують вимоги до корпоративного управління, незалежного контролю ризиків і технічного kill-switch, який повинен бути прив'язаний до чітких процедур і регулярно тестуватися [20, 21]. Звіти BIS і FMSB показують, що відсутність таких механізмів у поєднанні з алгоритмічними стратегіями призводить до різких рухів ринку та самопідсилюючих каскадів угод [22, 23]. Це безпосередньо стосується ML-

орієнтованих стратегій, де швидкість ухвалення рішень висока, а помилка моделі може швидко масштабуватися.

Окремий огляд Ради з фінансової стабільності узагальнює вплив широкого використання систем штучного інтелекту та машинного навчання у фінансових послугах на ринкову й системну стабільність та підкреслює необхідність вбудовування таких систем у вже наявні рамки управління ризиками [24].

Фреймворки ризик-менеджменту штучного інтелекту пропонують більш загальний рівень опису. NIST AI RMF вводить функції Govern, Map, Measure і Manage, які задають вимоги до ролей, процесів, оцінки ризиків і механізмів реагування для AI-систем [25]. Ці функції дають основу для опису життєвого циклу моделей у фінансових застосунках, але не деталізують, як пов'язати вимоги до управління моделями з криптографічними засобами, DeFi-загрозами та хмарними сервісами керування секретами.

Питання захисту секретів і даних у хмарі описані в основному в документації провайдерів і практичних гайдах. Microsoft, Amazon Web Services та Google Cloud рекомендують використовувати спеціалізовані служби керування секретами та ключами, напряду не зберігати API-ключі в коді й конфігураційних файлах, застосовувати принцип найменших привілеїв, приватні мережеві точки доступу та централізований аудит операцій з секретами [26-28]. Біржі та брокери у своїх рекомендаціях описують вимоги до HMAC-підпису запитів, обмежених вікон часу, жорстких rate-limit і прив'язки ключів до конкретних IP-адрес [29-31]. Ці документи дають чіткі вимоги до окремих компонентів торгової системи, але не розглядають їх як частину єдиного стеку, в якому дані проходять шлях від блокчейн-протоколу до моделі глибинного навчання та модуля виконання ринково-нейтральної стратегії.

Мета статті

Метою статті є розроблення та обґрунтування цілісного підходу до захисту даних у хмарній системі алгоритмічного криптотрейдингу, що реалізує ринково-нейтральні стратегії на основі моделей глибинного навчання. Для цього аналізуються криптографічні властивості протоколів Bitcoin та Ethereum, класи загроз для DeFi та біржових API, патерни керування секретами й шифрування даних у хмарній інфраструктурі, а також загрози для моделей машинного навчання, після чого формується узгоджена архітектура захисту та матриця «загроза-мітигація» з прикладом технічної реалізації.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є прототип хмарної системи алгоритмічного криптотрейдингу, що використовує біржові дані централізованої платформи, ознаковий конвеєр для агрегованих OHLCV-рядів, двохарвові моделі типу LSTM/GRU для прогнозування відносних

дохідностей та ринково-нейтральну стратегію з виконанням ордерів через біржові API. У дослідженні застосовано аналіз специфікацій блокчейн-протоколів, оглядів вразливостей DeFi та біржових API, документів регуляторів щодо алгоритмічного трейдингу, а також рекомендацій хмарних провайдерів щодо керування секретами; на основі цих джерел побудовано модель загроз для всієї системи, сформовано матрицю «загроза–мітигація» та реалізовано демонстраційний приклад із HMAC-підписом і часовим вікном для захисту запитів до API.

Виклад основного матеріалу

Розглянута система алгоритмічного криптотрейдингу побудована як багаторівневий конвеєр. Зовнішні джерела даних включають централізовану біржу Binance для спотових котирувань, DeFi-протоколи та ончейн-дані, а також деривативну платформу dYdX для виконання ринково-нейтральних стратегій. Потік ринкової інформації надходить до модуля збору даних,

далі до конвеєра ознак, який агрегує OHLCV-ряди, обчислює технічні індикатори та нормалізує ознаки. На наступному етапі працює сервіс моделі, де багатовалютна LSTM або GRU формує вектор прогнозів для групи активів. Ці прогнози обробляє стратегічний модуль, що формує ринково-нейтральні позиції, накладає ліміти ризику і генерує сигнали для шлюзу виконання ордерів, який взаємодіє з API бірж.

Архітектура зберігання даних містить окремі сховища для історичних ринкових рядів, наборів ознак, реєстру моделей та журналів торгів. Навколо обчислювальних компонентів розташовано хмарні сервіси безпеки: сховище секретів і ключів, служби керування ідентичностями та моніторинг. Саме через ці сервіси проходять усі операції читання API-ключів бірж, ключів шифрування та критичних параметрів стратегії. Таке розділення дозволяє чітко виділити зони довіри й визначити, які компоненти потрібно захищати від компрометації в першу чергу. Архітектуру системи та взаємодію між основними компонентами показано на рис. 1.

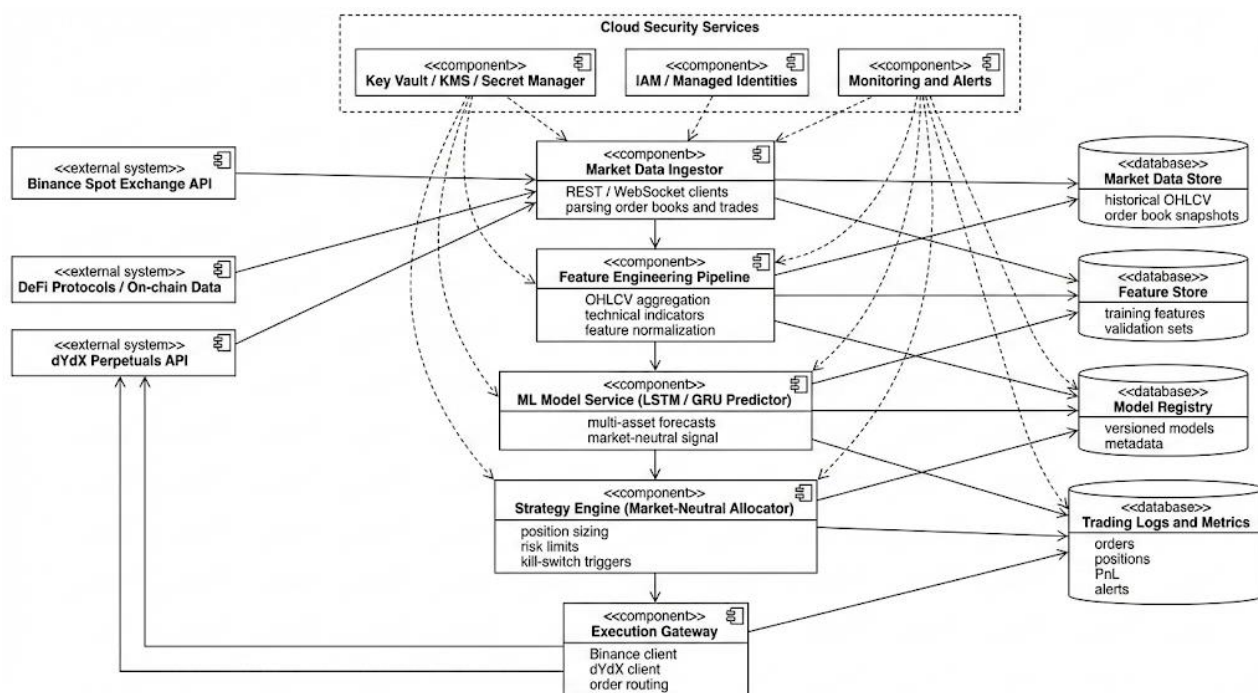


Рис. 1 – Архітектура хмарної системи алгоритмічного криптотрейдингу та її основні компоненти захисту даних

На вході конвеєра система отримує потоки котирувань, книг заявок і торгової активності зі спотових і деривативних бірж, а також цінові ряди та стани позицій із DeFi-протоколів. Ці дані вже містять перший рівень ризиків. Якщо API біржі або DeFi-протоколу піддається атакам типу re-entrancy, flash-кредитів чи маніпуляції ціною, то окремі часові фрагменти ринку суттєво спотворюються. У такому випадку модель, яка тренується на цих даних, вчиться на аномальних режимах і може відтворювати поведінку, вигідну

атакувальнику. Навіть якщо сам блокчейн зберігає цілісність журналу транзакцій, інтерфейс API стає точкою, де формується спотворений погляд на ринок.

Другий рівень ризику виникає всередині системи збору та підготовки даних. Якщо модуль завантаження працює без чітких правил щодо джерел, інтервалів та часових зон, то в історію потрапляють дублікати, прогалини й шматки даних, отримані через нестабільні мережеві з'єднання. За відсутності валідації і логування ці артефакти непомітно проходять до конвеєра ознак і

далі до моделі. Отруєння тренувального набору може відбутися як через цілеспрямовану підміну файлів, так і через неконтрольоване змішування різних режимів роботи біржі, коли, наприклад, у часі кластери високої волатильності поєднуються з періодами низької ліквідності.

Третій рівень стосується самого ML-сервісу та стратегічного модуля. Якщо доступ до моделі здійснюється через загальний REST-ендпоінт без чітких політик автентифікації, зломисник може надсилати спеціально сформовані вектори ознак, спостерігати відповіді й відтворити логіку стратегії [16, 17]. Журнали, що містять повні вектори входів і виходів моделі, створюють додаткову площу атаки. Компрометація цих журналів дозволяє відновити структуру ознак, діапазони значень та реакцію стратегії на різні сценарії ринку. Для ринково-нейтральної стратегії це особливо небезпечно, оскільки конкурент отримує можливість створити дзеркальну або контр-стратегію з використанням тих самих сигналів.

Четвертий рівень загроз пов'язаний із модулем виконання ордерів. Компрометація API-ключів, відсутність обмежень за IP-адресами та нечітке розділення прав доступу призводять до того, що сторонній користувач може не лише прочитати історію угод, а й відкривати нові позиції на повний ліміт, змінювати параметри ризику та вимикати механізми контролю. Якщо разом із цим відсутній централізований kill-switch, то навіть коректна модель і чисті дані не захистять від серії небажаних ордерів, які виконуються від імені системи. Саме тому подальші підрозділи присвячені

побудові хмарного контуру безпеки та контролю моделі й стратегії.

Для розміщення системи використовується захищене хмарне середовище з виділеною віртуальною мережею. Всередині цієї мережі працюють обчислювальні вузли з контейнерами або функціями, де розгорнуті модулі збору даних, сервіс моделі та стратегічно-виконавчий модуль. Жоден з цих компонентів не зберігає API-ключі або інші секрети локально. Доступ до секретів здійснюється лише через служби керування ключами та секретами, такі як Key Vault або KMS, з використанням керованих ідентичностей і ролей з мінімальними привілеями. Усі з'єднання між компонентами та сховищами проходять через внутрішні адреси в межах віртуальної мережі, а вихід до публічного інтернету дозволено лише з виконувальних модулів і тільки до доменів бірж.

Сховища даних розділені за призначенням: окремо зберігаються історичні ринкові ряди, набори ознак і снапшоти моделей, окремо журнали торгів і метрики ризику. Для цих сховищ вмикається шифрування на спокої з використанням ключів, якими керує KMS, а доступ контролюється як на рівні ролей, так і на рівні мережових правил. Журнали доступу до секретів і ключів, а також усі виняткові події безпеки надсилаються до системи моніторингу, де налаштовано сповіщення про підозрілі патерни. Взаємодію між обчислювальними вузлами, сервісами безпеки, сховищами даних і зовнішніми біржами у межах хмарного периметра показано на рис. 2.

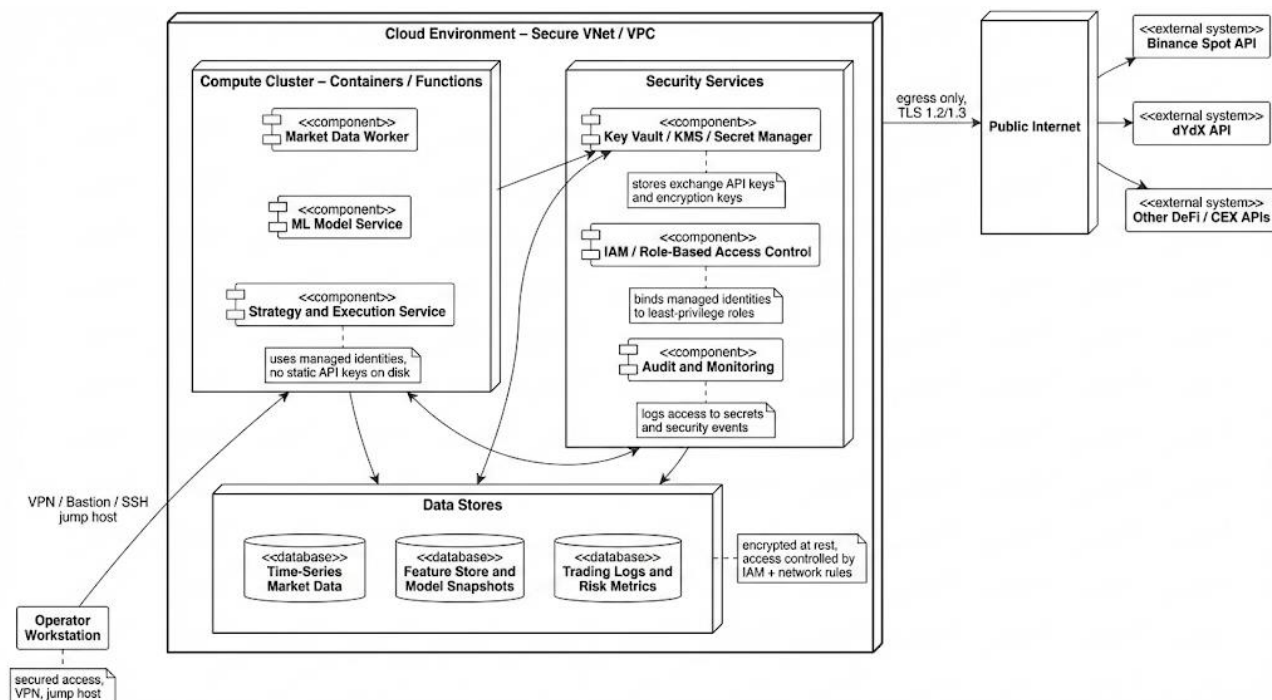


Рис. 2 – Розгортання компонентів торгової системи в межах захищеного хмарного середовища

Окремо проектується процедура аварійного відкликання. У разі підозри на компрометацію ключів або некоректну активність у журналах система автоматично відкликає або перевипускає секрети у сховищі, зупиняє контейнери з торговими стратегіями та блокує вихідний трафік до бірж до завершення розслідування. Такий сценарій реалізує технічний варіант kill-switch на рівні інфраструктури й узгоджується з рекомендаціями Azure, AWS та Google щодо реагування на інциденти безпеки.

Модель глибинного навчання навчається на історичних даних Binance з урахуванням комісій та обмежень ліквідності, а стратегія формує ринково-нейтральні портфелі з кількох активів. Для зменшення ризиків отруєння й перенавчання тренувальний набір формується з неперекривних часових відрізків, а перевірка проводиться за схемою покрокового просування у часі. Вхідні ряди проходять попередній контроль: видаляються дні з аномальною кількістю відключень, підозрілими сплесками обсягів та суттєвими розбіжностями

між біржами. Для поточної роботи моделі вводиться моніторинг розподілів ознак та виходів, щоб фіксувати відхилення від історичних профілів.

Стратегічний модуль має власний контур контролю. На кожному циклі оновлення позицій обчислюються ключові метрики ризику: поточний розмір плеча, концентрація позицій за окремими активами, добовий прибуток або збиток, а також ознаки деградації якості даних. Якщо одна або кілька метрик виходять за встановлені межі, спрацьовують локальні обмежувачі, які поступово знижують розмір позицій, і вмикається логіка kill-switch. Її ключові кроки такі: зупинка генерації нових ордерів, скасування активних заявок і тимчасове відкликання API-ключів у сховищі секретів. Після цього система переходить у стан, де відновлення можливо лише після ручної перевірки оператором. Послідовність дій у контурі kill-switch подано на рис. 3. Такий підхід відповідає вимогам регуляторів щодо можливості негайного припинення роботи алгоритмічної стратегії та повернення керування людині.

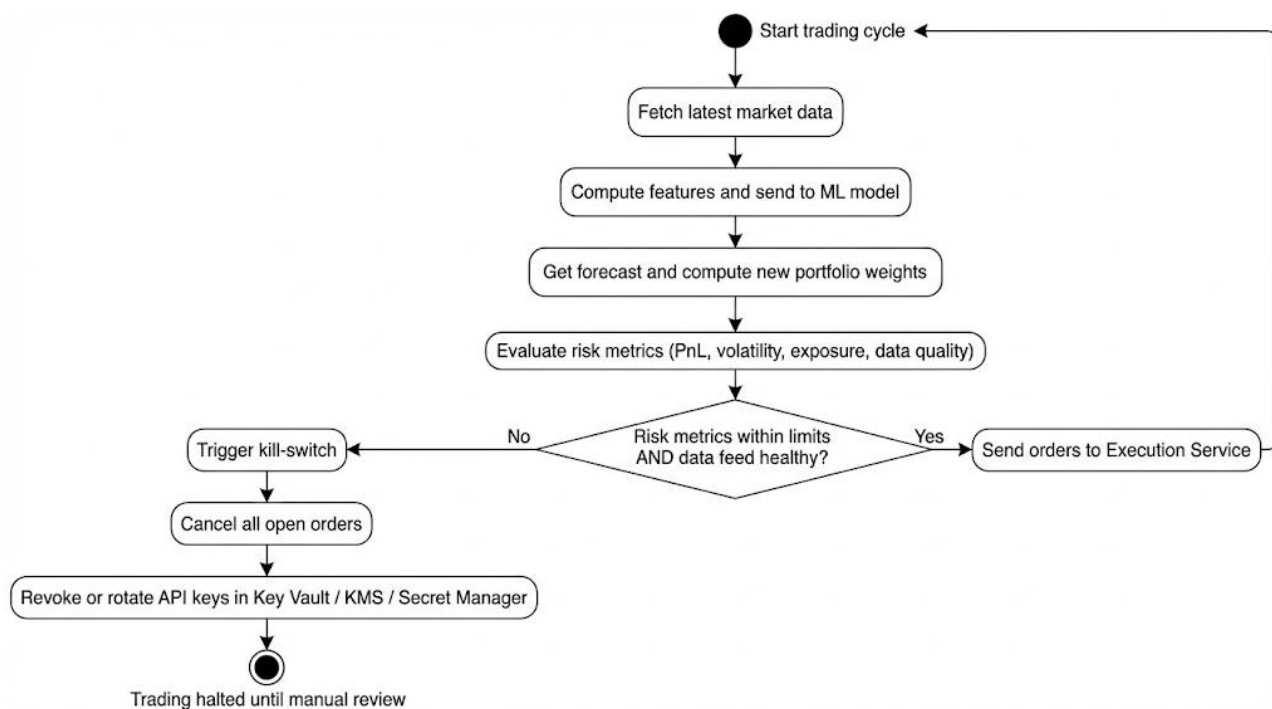


Рис. 3 – Логіка ризик-орієнтованого kill-switch для ринково-нейтральної торгової стратегії

Для ілюстрації впливу класичних механізмів захисту на рівні API проведено мініексперимент. Згенеровано послідовність зі 200 законних запитів до умовного торгового сервісу, кожен з яких містить метод, шлях, тіло запиту та мітку часу. Далі сформовано 120 повторних запитів, які імітують поведінку атакувальника, що перехопив законні повідомлення і намагається відтворювати їх із випадковою затримкою. Розглянуто два варіанти сервера. У першому варіанті сервер приймає всі запити без перевірки часу, попсе та HMAC, отже кожен повтор вважається успішним. У

другому варіанті сервер перевіряє коректність HMAC-SHA256, обмежує прийнятний часовий зсув до тридцяти секунд і не приймає один і той самий попсе двічі.

Результати показано на рис. 4. У сценарії без захисту кумулятивна кількість успішних повторних запитів зростає майже лінійно та досягає значення, близького до кількості спроб. У сценарії з HMAC-підписом і часовим вікном більшість повторів відхиляється: крива швидко виходить на плато, оскільки однакові запити з простроченими мітками часу або повторним попсе не проходять перевірку.

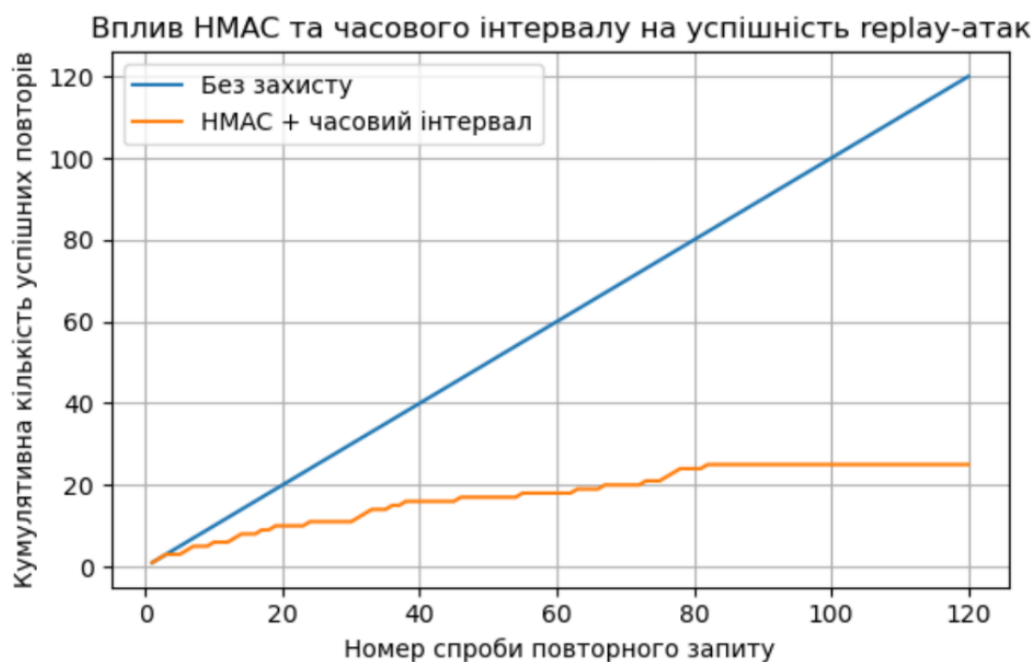


Рис. 4 – Вплив НМАС-підпису та часового інтервалу на успішність герплей-атак на торговий API

Хоча модель експерименту спрощена, вона демонструє, що навіть базові засоби захисту на рівні API істотно зменшують площу атаки. У реальній системі ці механізми доповнюються IP-обмеженнями, розділенням прав доступу для читання й торгівлі та моніторингом спроб автентифікації, що разом формує завершений контур захисту даних і операцій.

Висновки

В роботі сформовано цілісний погляд на захист даних у хмарній системі алгоритмічного криптотрейдингу з ринково-нейтральними стратегіями на основі моделей глибинного навчання. Показано, що криптографічні механізми блокчейн-протоколів самі по собі не гарантують безпеки торгових даних, оскільки основна площа атаки зміщується на рівні біржових і DeFi API, хмарної інфраструктури та ML-пайплайна.

Запропоновано архітектуру, у якій всі секрети та ключі централізовано зберігаються у хмарних службах керування ключами, доступ до них надається лише через керовані ідентичності з мінімальними привілеями, а сховища ринкових даних, ознак, моделей і журналів працюють у межах ізольованого мережевого периметра із шифруванням на спокої та в транзиті. Для моделі та стратегії описано окремий контур контролю, що включає фільтрацію даних, покрокову валідацію у часі, моніторинг розподілів ознак і виходів, обмеження на зміну позицій і ризик-орієнтований kill-switch, який зупиняє торгівлю та ініціює відкликання ключів у разі відхилень.

Мініексперимент з НМАС-підписом і часовим інтервалом показав, що навіть базові механізми

автентифікації й захисту від повторного відтворення запитів суттєво зменшують кількість успішних атак на торговий API. Це підтверджує доцільність поєднання класичних криптографічних засобів з інженерними практиками ротації ключів, обмеженням мережевого доступу та централізованим моніторингом. Подальший розвиток роботи може включати формальне моделювання загроз для складніших багатоступеневих стратегій з кількома горизонтами прогнозу, а також експериментальну перевірку стійкості моделей до цілеспрямованого отруєння даних на реальних потоках крипторинку.

Перелік використаних джерел

- [1] Cryptocurrency price forecasting – A comparative analysis of ensemble learning and deep learning methods / Bouteska A., Abedin M. Z., Hajek P., Yuan K. *International Review of Financial Analysis*. 2024. Vol. 92. Article 103055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.103055>.
- [2] Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. *SSRN Electronic Journal*. 2008. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3440802>.
- [3] Buterin V. Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform. Whitepaper, 2014. URL: <https://ethereum.org/en/whitepaper/> (дата звернення: 10.10.2025).
- [4] Wood G. Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger. *Ethereum Yellow Paper*, 2014. URL: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).

- [5] FIPS PUB 180-4: Secure Hash Standard (SHS). Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [6] FIPS PUB 202: SHA-3 Standard: Permutation-Based Hash and Extendable-Output Functions. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [7] Krawczyk H., Bellare M., Canetti R. HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication. RFC 2104, Internet Engineering Task Force, 1997. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC2104>.
- [8] Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. RFC 8446, Internet Engineering Task Force, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC8446>.
- [9] Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A Survey of Attacks on Ethereum Smart Contracts (SoK). *Principles of Security and Trust: Proceedings of the 6th International Conference*, Uppsala, Sweden, 22-29 April 2017. 2017. Vol. 10204. Pp. 164-186. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54455-6_8.
- [10] SoK: Decentralized Finance (DeFi) Attacks / L. Zhou et al. *IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Francisco, USA, 21-25 May 2023. Pp. 2444-2461. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP46215.2023.10179435>.
- [11] SoK: Decentralized Finance (DeFi) / S. Werner et al. *Proceedings of the 4th ACM Conference on Advances in Financial Technologies*, Cambridge, USA, 19-21 September 2022. Pp. 30-46. DOI: <https://doi.org/10.1145/3558535.3559780>.
- [12] Flash Boys 2.0: Frontrunning, Transaction Reordering, and Consensus Instability in Decentralized Exchanges / Hasan R., Crandall D., Fritz M., Kapadia A. *IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Francisco, USA, 18-21 May 2020. Pp. 318-335. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP40000.2020.00097>.
- [13] Attacking the DeFi Ecosystem with Flash Loans for Fun and Profit / Qin K., Zhou L., Livshits B., Gervais A. *Financial Cryptography and Data Security : 25th International Conference*, virtual Event, 1-5 March 2021. 2021. Pp. 3-32. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-64322-8_1.
- [14] Yerlikaya F. A., Bahtiyar Ş. Data poisoning attacks against machine learning algorithms. *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 208. Article 118101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118101>.
- [15] Manipulating Machine Learning: Poisoning Attacks and Countermeasures for Regression Learning / M. Jagielski et al. *IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Francisco, USA, 20-24 May 2018. Pp. 19-35. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP.2018.00057>.
- [16] Time series adversarial attacks: An investigation of smooth perturbations and defense approaches / G. Pilla et al. *International Journal of Data Science and Analytics*. 2025. Vol. 19. Pp. 129-139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41060-023-00438-0>.
- [17] Rigaki M., Garcia S. A survey of privacy attacks in machine learning. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 56(4). Article 101. Pp. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1145/3624010>.
- [18] European Securities and Markets Authority. Article 17 Algorithmic Trading. ESMA, 2014. URL: <https://www.esma.europa.eu/publications-and-data/interactive-single-rulebook/mifid-ii/article-17-algorithmic-trading> (дата звернення: 10.10.2025).
- [19] European Securities and Markets Authority. MiFID II Review Report on Algorithmic Trading. ESMA70-156-4572, 2021. 170 p.
- [20] Hong Kong Monetary Authority. Sound risk management practices for algorithmic trading. Circular, 06.03.2020. URL: <https://brdr.hkma.gov.hk/eng/docldg/docId/getPdf/20200306-4-EN/20200306-4-EN.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).
- [21] Prudential Regulation Authority, Bank of England. Supervisory Statement SS5/18: Algorithmic trading. London, 2018. URL: <https://www.bankofengland.co.uk/prudential-regulation/publication/2018/algorithmic-trading-ss> (дата звернення: 10.10.2025).
- [22] Markets Committee, Bank for International Settlements. FX execution algorithms and market functioning. BIS, 2020. URL: <https://www.bis.org/publ/mkctc13.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).
- [23] FICC Markets Standards Board. Emerging themes and challenges in algorithmic trading and machine learning. Spotlight Review, 2020. URL: <https://fmsb.com/wp-content/uploads/2020/04/FMSB-Spotlight-Review-Emerging-themes-and-challenges-in-algorithmic-trading-and-machine-learning.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).
- [24] Financial Stability Board. Artificial intelligence and machine learning in financial services: Market developments and financial stability implications. Basel, 2017. URL: <https://www.fsb.org/wp-content/uploads/P011117.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).
- [25] Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2023. 42 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1>.
- [26] Microsoft Corporation. Best practices for secrets management in Azure Key Vault. Microsoft Learn, 2023. URL: <https://learn.microsoft.com/azure/key-vault/secrets/secrets-best-practices> (дата звернення: 10.10.2025).
- [27] Amazon Web Services. AWS Secrets Manager best practices. AWS Documentation, 2024. URL: <https://docs.aws.amazon.com/secretsmanager/latest/userguide/best-practices.html> (дата звернення: 10.10.2025).
- [28] Google Cloud. Secret Manager best practices. Google Cloud Documentation, 2024. URL: <https://cloud.google.com/secret-manager/docs/best-practices> (дата звернення: 10.10.2025).
- [29] Binance. Signed endpoint security. Binance API Documentation, 2024. URL: <https://binance-docs.github.io/apidocs/spot/en/#signed-trade>

[user_data-and-margin-endpoint-security](#) (дата звернення: 10.10.2025).

- [30] dYdX Trading Inc. API Keys and Authentication. dYdX Documentation, 2023. URL: <https://docs.dydx.exchange> (дата звернення: 10.10.2025).

- [31] Interactive Brokers. Secure Your Trading Algorithms and Servers: General Guide. IBKR Quant News, 2020. URL: <https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/secure-your-trading-algorithms-and-servers-general-guide/> (дата звернення: 10.10.2025).

DATA PROTECTION AND SECURITY OF MACHINE LEARNING MODELS IN MARKET-NEUTRAL CRYPTOCURRENCY TRADING STRATEGIES

- | | |
|-----------------------|--|
| Levytska T.O. | PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3359-1313 , e-mail: levitskaya_t_a@pstu.edu ; |
| Kopiika O.S. | student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4117-4899 , e-mail: kopiika_o_s@students.pstu.edu ; |
| Pylypenko B.V. | student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4968-8190 , e-mail: pylypenko_b_v@pstu.edu |

Cryptocurrency markets and algorithmic crypto trading are increasingly relying on deep learning models and market-neutral strategies, which amplifies the requirements for data protection and model security. This paper presents an end-to-end approach to data protection in a cloud-based algorithmic cryptocurrency trading system that implements market-neutral strategies using machine learning models. We examine the cryptographic mechanisms of the Bitcoin and Ethereum protocols and their contribution to transaction integrity, non-repudiation, and resistance to replay. We then show how these guarantees interact with higher-level data flows in exchanges and DeFi protocols. We analyse typical threats in DeFi protocols and exchange APIs, including re-entrancy attacks, oracle manipulation, flash loans, MEV attacks, and abuse of API keys, and we highlight how these threats can distort training data, backtests, and live execution. We systematise data and secret protection patterns in Azure, AWS, and GCP cloud infrastructures, focusing on key and secret management services, encryption of data in transit and at rest, least-privilege access, network segmentation, and incident-driven key revocation. Special attention is paid to machine learning security threats in financial time-series forecasting, including data poisoning, adversarial perturbations, model extraction, and model inversion, and to their relationship with regulatory requirements for algorithmic trading and the NIST AI RMF framework. Using a prototype market-neutral crypto trading system based on LSTM/GRU models as a case study, we derive a threat-mitigation matrix, outline a risk-based kill-switch design that links portfolio risk metrics with technical controls, and propose practical architectural recommendations for data protection along the entire pipeline. In addition, we provide a small experiment with HMAC-SHA256 signing and a timestamp window for exchange API requests, demonstrating the detection and blocking of replay attempts and showing how standard cryptographic tools can be embedded into the trading stack without changing the economic logic of the strategy.

Keywords: data protection, cryptocurrency trading, market-neutral strategies, machine learning, deep learning, cloud infrastructure, information security, DeFi, HMAC, kill-switch.

References

- | | |
|--|---|
| <p>[1] A. Bouteska, M.Z. Abedin, P. Hajek, and K.Yuan, "Cryptocurrency price forecasting – A comparative analysis of ensemble learning and deep learning methods," <i>International Review of Financial Analysis</i>, vol. 92, article 103055, 2024. doi: 10.1016/j.irfa.2023.103055</p> <p>[2] S. Nakamoto, "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System," <i>SSRN Electronic Journal</i>, pp. 1-9, 2008. doi: 10.2139/ssrn.3440802.</p> <p>[3] V. Buterin, "Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform". 2014. URL: https://ethereum.org/en/whitepaper/ (дата звернення: 10.10.2025).</p> <p>[4] Wood G. Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger. Ethereum Yellow Paper,</p> | <p>2014. [Online]. Available: https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf. Accessed on: October 10, 2025.</p> <p>[5] <i>Secure Hash Standard (SHS)</i>, FIPS PUB 180-4, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2015.</p> <p>[6] <i>Permutation-Based Hash and Extendable-Output Functions</i>, FIPS PUB 202: SHA-3 Standard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2015.</p> <p>[7] H. Krawczyk, M. Bellare, and R. Canetti, <i>HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication</i>. RFC 2104, Internet Engineering Task Force, 1997. doi: 10.17487/RFC2104.</p> |
|--|---|

- [8] E. Rescorla, *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. RFC 8446*, Internet Engineering Task Force, 2018. doi: **10.17487/rfc8446**.
- [9] N. Atzei, M. Bartoletti, and T. Cimoli, "A Survey of Attacks on Ethereum Smart Contracts (SoK)," in *Proc. of the 6th Int. Conf. «Principles of Security and Trust»*, Uppsala, Sweden, April 22-29, 2017, vol. 10204, pp. 164-186. doi: **10.1007/978-3-662-54455-6_8**.
- [10] L. Zhou, X. Xiong, J. Ernstberger, S. Chaliasos, Z. Wang, and Y. Wang, "SoK: Decentralized Finance (DeFi) Attacks," in *Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Francisco, USA, May 21-25, 2023, pp. 2444-2461. doi: **10.1109/SP46215.2023.10179435**.
- [11] S. Werner, D. Perez, L. Gudgeon, A. Klages-Mundt, D. Harz, and W. Knottenbelt, "SoK: Decentralized Finance (DeFi)," in *Proc. of the 4th ACM Conf. on Advances in Financial Technologies*, Cambridge, USA, Sept. 19-21, 2022, pp. 30-46. doi: **10.1145/3558535.3559780**.
- [12] R. Hasan, D. Crandall, M. Fritz, and A. Kapadia, "Flash Boys 2.0: Frontrunning, Transaction Reordering, and Consensus Instability in Decentralized Exchanges," in *Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Francisco, USA, May 18-21, 2020, pp. 318-335. doi: **10.1109/SP40000.2020.00097**.
- [13] K. Qin, L. Zhou, B. Livshits, and A. Gervais, "Attacking the DeFi Ecosystem with Flash Loans for Fun and Profit," in *Proc. of the 25th Int. Conf. «Financial Cryptography and Data Security»*, virtual event, March 1-5, pp. 3-32. doi: **10.1007/978-3-662-64322-8_1**.
- [14] F.A. Yerlikaya, and Ş. Bahtiyar, "Data poisoning attacks against machine learning algorithms," *Expert Systems with Applications*, vol. 208, article 118101, 2022. doi: **10.1016/j.eswa.2022.118101**.
- [15] M. Jagielski, A. Oprea, B. Biggio, C. Liu, C. Nita-Rotaru, and B. Li, "Manipulating Machine Learning: Poisoning Attacks and Countermeasures for Regression Learning," in *Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Francisco, USA, May 20-24, 2018, pp. 19-35. doi: **10.1109/SP.2018.00057**.
- [16] G. Pialla et al., "Time series adversarial attacks: An investigation of smooth perturbations and defense approaches," *International Journal of Data Science and Analytics*, vol. 19, pp. 129-139, 2025. doi: **10.1007/s41060-023-00438-0**.
- [17] M. Rigaki, and S. Garcia, "A survey of privacy attacks in machine learning," *ACM Computing Surveys*, vol. 56(4), article 101, pp. 1-34, 2023. doi: **10.1145/3624010**.
- [18] European Securities and Markets Authority. Article 17 Algorithmic Trading. ESMA, 2014. [Online]. Available: <https://www.esma.europa.eu/publications-and-data/interactive-single-rulebook/mifid-ii/article-17-algorithmic-trading>. Accessed on: October 10, 2025.
- [19] "MiFID II Review Report on Algorithmic Trading ESMA70-156-4572," European Securities and Markets Authority, 2021.
- [20] Hong Kong Monetary Authority. Sound risk management practices for algorithmic trading. Circular, 06.03.2020. [Online]. Available: <https://brdr.hkma.gov.hk/eng/doc-ldg/doc-cId/getPdf/20200306-4-EN/20200306-4-EN.pdf>. Accessed on: October 10, 2025.
- [21] Prudential Regulation Authority, Bank of England. Supervisory Statement SS5/18: Algorithmic trading. London, 2018. [Online]. Available: <https://www.bankofengland.co.uk/prudential-regulation/publication/2018/algorithmic-trading-ss>. Accessed on: October 10, 2025.
- [22] Markets Committee, Bank for International Settlements. FX execution algorithms and market functioning. BIS, 2020. [Online]. Available: <https://www.bis.org/publ/mkctc13.pdf>. Accessed on: October 10, 2025.
- [23] FICC Markets Standards Board. Emerging themes and challenges in algorithmic trading and machine learning. Spotlight Review, 2020. [Online]. Available: <https://fmsb.com/wp-content/uploads/2020/04/FMSB-Spotlight-Review-Emerging-themes-and-challenges-in-algorithmic-trading-and-machine-learning.pdf>. Accessed on: October 10, 2025.
- [24] Financial Stability Board. Artificial intelligence and machine learning in financial services: Market developments and financial stability implications. Basel, 2017. [Online]. Available: <https://www.fsb.org/wp-content/uploads/P011117.pdf>. Accessed on: October 10, 2025.
- [25] *Artificial Intelligence Risk Management Framework*, AI RMF 1.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 2023. doi: **10.6028/NIST.AI.100-1**.
- [26] Microsoft Corporation. Best practices for secrets management in Azure Key Vault. Microsoft Learn, 2023. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/azure/key-vault/secrets/secrets-best-practices>. Accessed on: October 10, 2025.
- [27] Amazon Web Services. AWS Secrets Manager best practices. AWS Documentation, 2024. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/secretsmanager/latest/userguide/best-practices.html>. Accessed on: October 10, 2025.
- [28] Google Cloud. Secret Manager best practices. Google Cloud Documentation, 2024. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/secret-manager/docs/best-practices>. Accessed on: October 10, 2025.
- [29] Binance. Signed endpoint security. Binance API Documentation, 2024. [Online]. Available: <https://binance-docs.github.io/apidocs/spot/en/#signed-trade-user-data-and-margin-endpoint-security>. Accessed on: October 10, 2025.
- [30] dYdX Trading Inc. API Keys and Authentication. dYdX Documentation, 2023. [Online]. Available:

<https://docs.dydx.exchange>. Accessed on: October 10, 2025.

trading-algorithms-and-servers-general-guide/. Accessed on: October 10, 2025.

Ac-

[31] Interactive Brokers. Secure Your Trading Algorithms and Servers: General Guide. IBKR Quant News, 2020.

[Online]. Available: [https://www.interac-](https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/secure-your-)
[tivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/secure-your-](https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/secure-your-)

Стаття надійшла 10.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Левицька Т. О., Копійка О. С., Пилипенко Б. В. Захист даних і безпека моделей машинного навчання в ринково-нейтральних стратегіях криптотрейдингу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 83-92. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350997>.

132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669.14.018.29:621.771.23:539.42

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.350999

STABILIZATION OF LOW-TEMPERATURE IMPACT TOUGHNESS IN HEAVY STRUCTURAL STEEL PLATES BY ADJUSTING NORMALIZING ROLLING PARAMETERS

Chabak Yu.G.	D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3743-7428 , e-mail: chabak_y_g@gmail.com ;
Sili I.I.	PhD, docent, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6603-2174 , e-mail: sili_i_i@pstu.edu ;
Efremenko B.V.	PhD, docent, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0438-6433 , e-mail: efremenko_b_v@pstu.edu ;
Stavrovskaja V.E.	PhD, associated professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: stavrovskaja_v_e@pstu.edu ;
Sagirov R.I.	PJSC «KAMET-STEEL», Kamyanske, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3575-8324 , e-mail: ruslan.sagirov1970@gmail.com ;
Efremenko V.G.	D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4537-6939 , e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu

The article focuses on optimizing the production technology for structural steel plates with a thickness of 51-100 mm to stabilize low-temperature impact toughness. The study investigates the influence of normalizing rolling parameters, microstructural characteristics, and chemical composition on the fracture energy of steel at -20°C . Based on the analysis of automated data («Detailing rolling protocol») and Charpy impact test results, it was established that the decisive factor for forming a fine-grained structure (grain size No. 8-10) is the strict adherence to the regulation of the roughing and finishing stages of normalizing rolling, ensuring the necessary deformation forces and inter-pass pauses. It is shown that to ensure stable impact toughness (fracture energy exceeding 27 J), the total reduction in the finishing stand must be at least 15-20% with forces of 29.4-34.3 MN (3000-3500 tf) during the initial passes. It was found that a decrease in these parameters leads to the formation of an inhomogeneous structure with coarse grains, which sharply reduces cold resistance. Additionally, the qualitative influence of non-metallic inclusions and carbon content on mechanical properties was determined. Practical recommendations have been formulated to improve the technological regulations for normalizing rolling, allowing for the avoidance of costs associated with additional thermal treatment of the plates.

Keywords: normalizing rolling, steel plates, low-carbon steel, impact toughness, microstructure, ferrite grain, rolling force, non-metallic inclusions.

Problem statement

Steel plates with a thickness of 51-100 mm are widely used in many industries, such as infrastructure construction, shipbuilding, the energy sector, heavy machinery manufacturing, etc. The plates are mainly produced from low-carbon structural steels of strength categories S235JR(J0, J2), S275JR(J0, J2), BVE, P265GH, etc., smelted without the use of scarce alloying elements (Cr, Ni, Mo, Cu), or with microalloying using V, Nb, Ti. In the production of plates, an energy-saving technology of thermo-deformational treatment is used which is a normalizing rolling (NR). The finished plates are underwent a Charpy testing at a temperature of -20°C , during which the impact energy absorbed for the steel's fracture is determined. A significant portion of the results from primary tests of steel plates does not meet the standard requirements for this indicator (not less than 27 J). This leads to repeated testing or even full-volume heat treatment of the plates (normalization), which significantly increases technological costs and reduces the efficiency of metallurgical

production. In this regard, the task arose to improve the low-temperature impact toughness of steel plates by refining the production technology, in particular by optimizing the parameters of thermo-mechanical treatment.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Conventional hot rolling (HR) of steel products starts at $1150-1200^{\circ}\text{C}$ and finishes at a temperature above 1000°C . Normalizing rolling differs from HR by much lower finish temperature, which is approximately equivalent to the heating temperature used in normalization – a full-volume heat treatment of steel with separate heating [1, 2]. For carbon and low-alloy structural steels, this temperature usually lies in the lower part of austenitic domain, i.e., above the Ac_3 temperature, within $820-950^{\circ}\text{C}$ [3, 4]. NR allows obtaining a microstructure with refined ferrite grains, similar to those of normalized steel. At the same time, NR eliminates the need for energy consumption in performing normalization, thus, it has an energy-saving

orientation and is therefore attractive to manufacturers of metallurgical products [5]. Due to lower finish rolling temperature, NR allows to inhibit the dynamic recrystallization in the deformed metal, meaning that the accumulated crystal lattice defects are partially retained in the structure contributing to the steel's strengthening [1]. Therefore, normalizing rolling may, in a certain sense, be classified as thermo-deformational treatment [6, 7]. The inhibition of recrystallization under NR is promoted by microalloying the steel with strong carbide-forming elements – Nb, Ti, and V [8, 9]. Niobium is particularly effective, as it precipitates from austenite during rolling in the form of dispersed carbonitrides, which effectively pin dislocations, preventing their movement and annihilation [1, 10]. The mechanical properties of rolled products produced through NR, are less stable and susceptible to fluctuations in various technological factors (slab thickness [11, 12], texture [13], reduction value [2, 14], time pauses between passes [15], etc.). While these negative effects can be mitigated by conventional normalization, this option is unavailable in NR. Consequently, rigorous control over key NR process parameters is essential to guarantee the quality of the finished plates. Since the main microstructural component of steel after NR is fine ferritic grain resulted from austenite recrystallization, the deformation regime in the finishing stage of NR is particularly important, as it determines the degree of austenite pancaking and the kinetics of recrystallization processes [16]. However, insufficient attention has been paid to this issue so far. To address this research gap, the present work was aimed at solving the problem of instability in the impact toughness of steel plates by investigating the influence of normalizing rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of the finished rolled product.

The purpose and tasks of the research

The purpose of the article is to develop proposals for improving the technology of producing steel structural plates by optimizing the technological parameters of thermo-deformational treatment, namely the normalizing rolling process.

Materials and methods

The research materials were plates with a thickness of 55-100 mm, the strength categories and chemical composition of which are provided below in the text.

The plates were rolled from slabs with a thickness of 220-250 mm, obtained by the oxygen-converter method with continuous casting of steel. The slabs were heated to 1150-1180°C and rolled on a 3600 mill to the required thickness using normalizing rolling technology. After air cooling, the workpieces of 150 × 300 (mm) in planes were cut from the plates, from which the samples were prepared for mechanical testing. The absorbed impact energy (KV_{20°C}) was determined in accordance with DSTU ISO 148-1:2022, by the Charpy method, using the prismatic specimens with dimensions 10×10×55 (mm) having a V-notch.

The specimens were cut from the samples parallel to the rolling direction, at a depth of ¼ of the plate thickness. The temperature of the specimens at the moment of testing was –20°C.

The microstructure of the specimens was studied on specimens prepared on the fractured Charpy specimens. The surface of the specimens was polished according to the standard procedure and etched with a 4% solution of nitric acid in ethyl alcohol. The microstructure was examined using an optical microscope «Axiovert 40 MAT» (Carl Zeiss) at magnifications from 100 to 500 times. The ferritic grain size was determined according to the standard DSTU EN ISO 643:2022.

Results and discussion

Normalizing rolling is intended to form a structure in the steel that is as close as possible to that obtained by normalization. Therefore, it is important to ensure an optimal reduction schedule for the slab during normalizing rolling in order to achieve maximum grain refinement. The latter becomes possible with higher reduction in the final passes combined with a decrease in a plate temperature. This approach is aimed at obtaining the deformed austenite, which is prone for recrystallization to form new (undeformed) grains. Preventing the growth of these grains is possible by inhibiting the process of collective recrystallization of austenitic grains due to the reduction in the finishing temperature of normalizing rolling.

According to standard technology, normalizing rolling of plates is carried out in two stages. The roughing stage is intended to reduce the slab to an intermediate thickness at high temperatures. An air cooling pause is then implemented to lower the metal temperature, followed by the finishing stage. Rolling parameters (number of passes, reduction per pass, and pause duration) play a critical role and require additional analysis, as they directly affect the mechanical properties of the finished product. The degree of deformation-induced structural refinement (or «working») of the metal is vital for improving the as-cast structure of the slab. The intensity of deformation can be assessed by the «Maximum Force» applied for each pass – a parameter automatically recorded to form a comprehensive rolling log (or «Detailing force protocol») of the process.

To analyze the influence of NR parameters, an experiment was conducted in which the following were analyzed: 1) the number of passes in the roughing and finishing stages, 2) the maximum rolling force in the passes, 3) the duration of the pause between stages. The study was carried out during the production of a batch of 60 mm thick plates of S355J2+N steel (chemical composition: 0,12% C; 1,55% Mn; 0,24% Si; 0,003% S; 0,12% P; 0,033% Al; 0,016% Ti; 0,036% Nb; 0,050% V).

Analysis of the rolling details showed that variations in the main rolling parameters occurred in different plates, specifically: a) the total duration of the roughing stage varied from 100 s to 200 s with the number of passes ranging from 5 to 10; b) the maximum force in the last passes of

roughing rolling changed from 2300 tf to 3000 tf; c) the pause between roughing and finishing stages varied from 232 s to 345 s; d) the number of passes in the finishing stage ranged from 5 to 9; e) the maximum force in the first two passes of the finishing stage ranged from 2800 tf to 3450 tf. As an example, Figure 1 shows the rolling details for

four plates from the experimental batch, and their mechanical properties are presented in Table 1. When studying these plates, samples were taken at a depth of $\frac{1}{4}$ thickness from both sides of the plate («Top» and «Bottom»), as well as from the centerline of the plate.

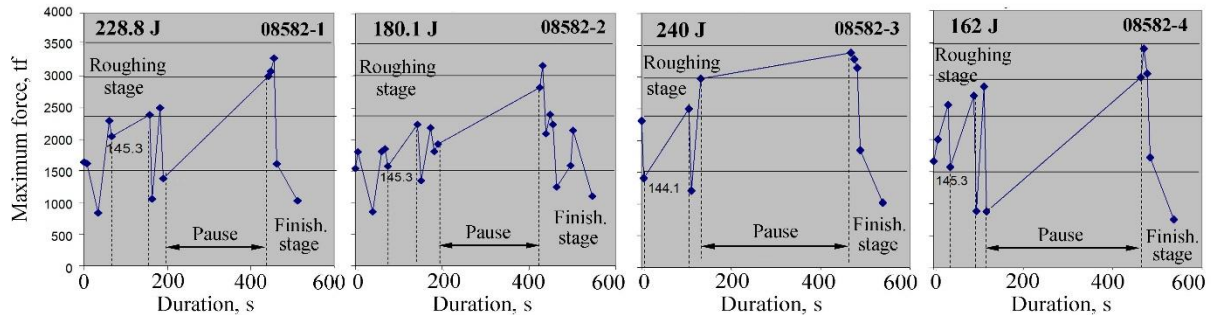


Fig. 1 – The force protocols of the normalizing rolling of the 60 mm thick plates of a S355J2+N grade (numbers of plates: 08582-1, 08582-2, 08582-3, 08582-4).

Table 1

Mechanical properties of the 60 mm thick plates of a S355J2+N grade (after normalizing rolling)

Plate number	Place of cutting	Yield strength, N/mm ²	Tensile strength, N/mm ²	Total elongation, %	Absorbed impact energy at –20°C, J		Grain number
					Current values	Average	
08582-1	Top	469	581	30,5	214, 217, 220	217,0	9
	Bottom	–	–	–	269, 241, 276	262,0	9-8
	Center-line	–	–	–	206, 250, 293	249,7	10-9
	Average for the plate:				228,8		
08582-2	Top	443	571	31	140, 194, 185	173,0	10-9
	Bottom	437	576	29	180, 192, 208	193,3	10
	Center-line	429	568	28,4	134, 236, 152	174,0	9-10
	Average for the plate:				180,1		
08582-3	Top	479	584	30	241, 256, 260	252,3	9
	Bottom	–	–	–	220, 247, 283	250,0	9-10
	Center-line	–	–	–	224, 300, 228	250,7	9-10
	Average for the plate:				239,5		
08582-4	Top	435	586	30	184, 139, 185	169,3	9
	Bottom	430	577	29,5	146, 185, 171	167,3	8-9
	Center-line	407	573	29	175, 135, 176	162,0	9
	Average for the plate:				166,2		

Analysis of the results showed that the plates fully met the standard requirements in mechanical properties including the impact energy at –20 °C, which varied from 135 J to 283 J, with average values for each plate ranging from 166.2 J to 239.5 J (which significantly exceeded the minimum standard limit – 27 J). The highest level of the KV_{–20°C} was observed in plates # 08582-1 (average value of 228,8 J) and # 08582-3 (239,5 J). Their rolling regime was distinguished by: a) an increased (up to 100 s) pause within the roughing stage after reaching a rolled thickness of 144-145 mm; b) an extended pause between stages, during which the plate cooled to 850-870°C; c) maximum

rolling force (3200-3400 tf) in the first 2-3 passes in the finishing stage.

The microstructure of these plates is shown in Figure 2 consisting of fine-grained ferrite (grain numbers 9-10) and pearlite bands stretched along the rolling direction. Alongside the primarily small grains (1-3 μm), there were individual fairly large grains (20-30 μm) or deformed ones with dimensions (15-20) × (30-35) μm (indicated by arrows in Fig. 2a). However, the presence of these coarse grains did not deteriorate the overall high impact toughness of steel.

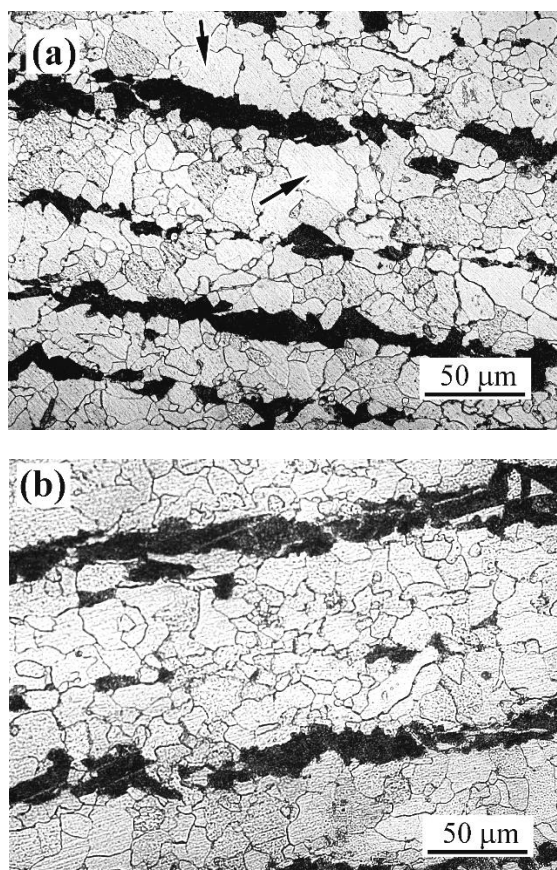


Fig. 2 – The microstructure of the plates:
(a) # 08582-3; (b) # 06875

A similar normalizing rolling scheme was implemented when producing a batch of 60 mm thick plates of S355 steel (0,12% C, 1,50% Mn, 0,22% Si, 0,004% S, 0,012% P, 0,028% Al, 0,014% Ti, 0,036% Nb, 0,050% V) (Fig. 3). The plate processed under this regime exhibited the following mechanical properties: yield strength – 448 N/mm²; ultimate tensile strength – 546 N/mm²; total elongation – 29,5%; absorbed impact energy at –20 °C – 152-215 J (average value of 188.8 J). The structure consisted of ferrite and pearlite, with a grain size of No. 9-10 (Fig. 2b).

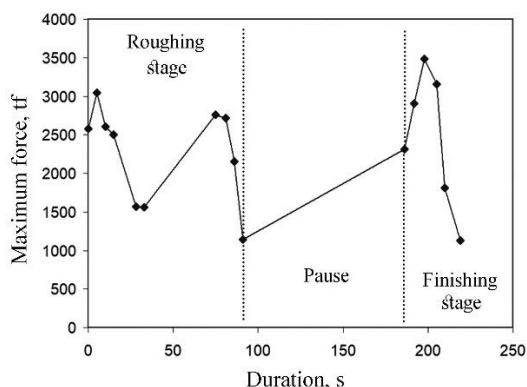


Fig. 3 – The detailed force protocol of the normalizing rolling of 60 mm thick plate (S355 grade)

The advisability of significant reduction in the first passes of finishing rolling was further confirmed during the rolling of S355 steel plates of various thicknesses – from 55 mm to 100 mm. The highest values of absorbed impact energy at –20°C (230-241 J) were recorded for the 55 mm thick plate, for which finishing rolling began with four passes at a maximum force of 3400-3750 tf. If the first finishing passes were performed with lower force (2400-3100 tf), the impact energy was unstable, varying from 13 to 274 J. The lowest impact energy values (3-12 J) referred to the 100 mm thick plate, for which the maximum forces at the start of finishing rolling were only 1350-1650 tf.

Based on the results of the conducted experiments, the optimal rolling scheme for S355 steel plates is formulated as follows (Fig. 4a):

1. Start of rolling in the roughing stage (at 1000-1080°C): the first two passes – at 3000-3500 tf, decreasing to 2000 tf, until reaching a thickness of 140-150 mm.
2. Pause of at least 80 s.
3. After the pause: the first two passes – with a force of 2500-3000 tf, decreasing to 1500 tf, until obtaining an intermediate slab thickness of 102-104 mm.
4. Pause between roughing and finishing stages – until the metal temperature lowers to 850-870°C.
5. Finishing stage: the first 2 passes – with a force of 3000-3500 tf, the 3^d-4th passes – 2000 tf, the last ones – at 1000-1200 tf (at 820-840°C).
6. Total reduction degree in the finishing stage – 15-20%.

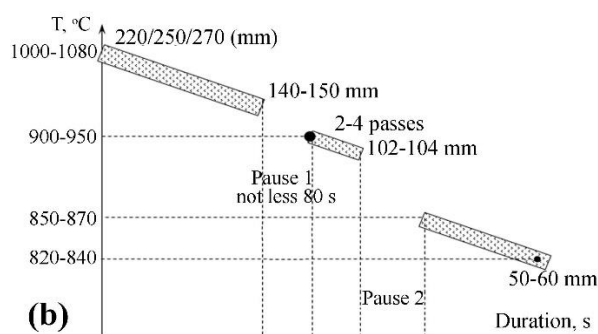
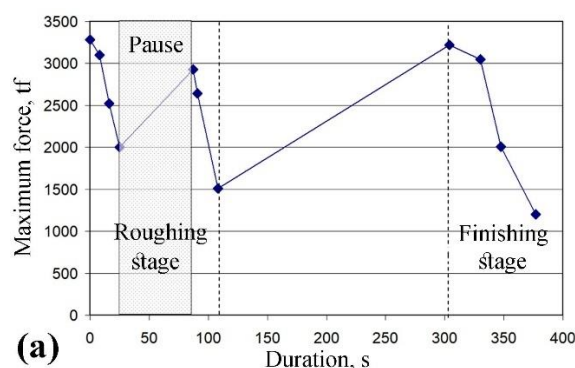


Fig. 4 – (a) Optimal force protocol and (b) a «Temperature-Time» schedule proposed for normalizing rolling of 50-60 mm thick plates (S355 grade)

The total reduction is very important, as it ensures the degree of austenite deformation necessary for effective grain refinement during recrystallization of the γ -phase and its phase transformation. The total reduction in the finishing stage should be at least 15-20%. With lower total reduction (11,6-12,2%), unsatisfactory impact test results were recorded, which was associated with insufficient deformation working of the metal (Fig. 5). The recommended technological regime for normalizing rolling of steel plates (a «Temperature-Time» schedule) is presented in Fig. 4b.

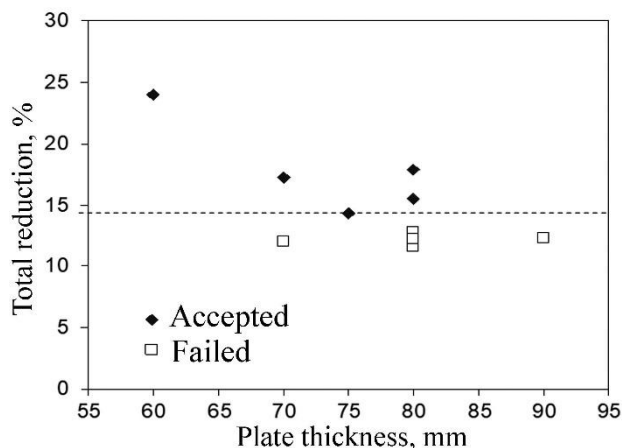


Fig. 5 – Effect of total reduction at the finishing stage of NR on the results of impact testing at -20°C (the plates of S355 grade). (Accepted: The result met the standard norm; Failed: The test was not passed)

It is well known that low-temperature impact energy depends on the actual grain size and the contamination of the metal with non-metallic inclusions. The relationship between these parameters was investigated using specimens with different levels of absorbed impact energy (categorized as «ductile» and «brittle»), selected from 75 mm thick normalizing-rolled plates (Nos. 7907, 07376-2, and 07376-3). The microstructural analysis of the specimens revealed that:

a) all specimens contained non-metallic inclusions, namely: non-deformable silicates (NDS) (grade 2-5) and point oxides (grade 1-2). In «brittle» specimens (with absorbed energy below the norm), the contamination with NDS was 0,5-2,5 points higher than in «ductile» ones;

b) «ductile» specimens generally had finer ferritic grain (Nos. 8 or 8-7), while in «brittle» specimens, grains of Nos. 7 and 7-8 were recorded. In addition, «brittle» specimens revealed the presence of individual large grains No. 6 and bainitic bands (the latter are uncharacteristic for the metal at a depth of $\frac{1}{4}$ plate thickness). The relationship between grain size and impact energy at -20°C is presented in Fig. 6. It can be seen that the dependencies have a classical character, reflecting an increase in impact energy with

an increase in grain size number (which corresponds to grain refinement). At the same time, data relating to different plates do not fit into a single scatter band but form two separate bands that do not overlap. For plates No. 07376-2 and No. 07376-4, this dependence corresponds to a smaller grain size number, meaning that in them high impact energy values (100-150 J) are achieved with coarser grain. This is clearly seen from the comparison of microstructure images of «ductile» specimens taken from plates No. 07907 and No. 07376-2 (Fig. 7). Such behavior was not affected by the contamination with non-metallic inclusions which was approximately similar for both plates. This suggests the presence of another factor that, in addition to grain size, affects the absorbed impact energy. Such a factor may be carbon, which increases the amount of the brittle structural component (cementite), increasing the volume fraction of pearlite. The carbon content in these specimens was 0,15% (No. 7907) and 0,13% (No. 07376-2). Thus, a reduction in carbon content compensated for the coarser grain in the metal of plate No. 07376-2, allowing the achievement of the same improved impact toughness as in fine-grained steel with higher carbon content (No. 7907).

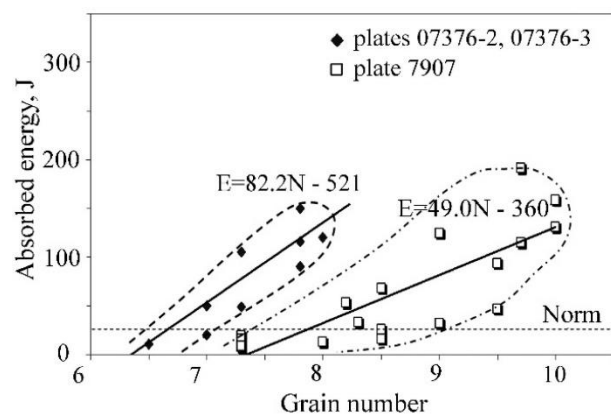


Fig. 6 – Ferrite grain size vs. absorbed impact energy at -20°C in plates of 75 mm thick (plates numbers 07907, 07376-2, and 07376-3)

The conducted studies showed that the stability of low-temperature impact toughness of steel plates produced using normalizing rolling, with a thickness of 51-100 mm, depends on various technological factors, among which the main ones are the rolling parameters in the roughing and finishing stages, as well as the carbon content and contamination of the steel with non-metallic inclusions.

Further extensive research is required to fully elucidate the effect of carbon content on the low-temperature impact toughness of steel plates produced by normalizing rolling.

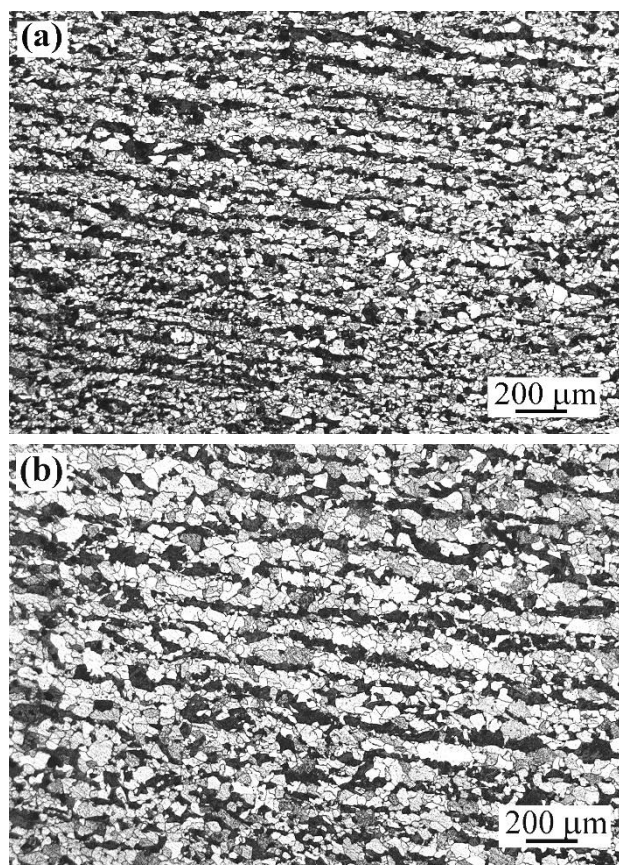


Fig. 7 – The microstructure of the «ductile» specimens taken from the plates: (a) # 07907 (159 J) and (b) # 07376-2 (116 J)

Conclusions

This work was aimed at improving the technology of normalizing rolling of steel plates thicker than 50 mm in order to prevent negative results during low-temperature impact toughness testing. As a result of this work, the following conclusions were drawn:

1. It has been established that the stability of low-temperature impact toughness of steel plates with a thickness of 51-100 mm critically depends on the regime of normalizing rolling, in particular on the duration of pauses between the roughing and finishing stages and the sequence of changes in maximum forces during passes within each stage.

2. It has been shown that to form a fine-grained structure (grain size number 8-10) and ensure impact energy exceeding 27 J at -20°C , the total reduction degree in the finishing stage must be at least 15-20 %, with forces in the first finishing passes of 3000-3500 tf (29.4-34.3 MN). Insufficient hot “working” of the metal leads to a heterogeneous structure with coarse grains and bainitic bands, causing the absorbed impact energy to drop to critical values (3-12 J).

3. A direct relationship has been established between unsatisfactory low-temperature toughness and elevated

carbon content as well as contamination of the steel with non-metallic inclusions.

4. An optimized technological regime for normalizing rolling of plates from low-alloy steels of strength categories S235-S355 has been proposed, which includes the introduction of inter-rolling pauses for gradual cooling of the intermediate slab to 850-870 $^{\circ}\text{C}$ and intensive deformation in the finishing stage, ensuring the required cold resistance of the product without additional heat treatment (normalization).

Funding and Acknowledgments

The work was carried out within the framework of a scientific project for young scientists, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine (state registration number 0123U100374).

References

- [1] A.A. Gorni, and M.R. Soares da Silva, “Microstructural evolution of the normalizing plate rolling of niobium microalloyed steels,” *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, vol. 12(1), pp. 72-76, 2015. doi: 10.4322/2176-1523.0750.
- [2] R. Faria, A. Gorni, D. Matsubara, R. Viana Jr., J. da Silveira, and M. Rebel, “Influence of the Normalizing Rolling Parameters on the Toughness of a Nb, V and Ti Microalloyed Steel Processed in the Gerdau Plate Mill,” in *Proc. of the Iron & Steel Technology Conf. «AISTech 2019»*, Philadelphia, USA, May 6-9, 2019. doi: 10.33313/377/191.
- [3] X.-l. Wen, Z. Mei, B. Jiang, L.-C. Zhang, Y.-Z. Liu, “Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 671, pp. 233-243, 2016. doi: 10.1016/j.msea.2016.06.059.
- [4] M. Knapinski, B. Koczurkiewicz, A. Kawalek, and H. Dyja, “The Physical Simulation of the Normalizing Rolling of the Steel Plate in Strength Category 350÷460 MPa,” *Materials Science Forum*, vol. 638-642, pp. 2604-2609, 2010. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.2604.
- [5] V. Zurnadzy et al., “Enhancing the tensile properties and ductile-brittle transition behavior of the EN S355 grade rolled steel via cost-saving processing routes,” *Materials*, vol. 17, article 1958, 2024. doi: 10.3390/ma17091958.
- [6] L. Wang, C.-R. Gao, Y.-F. Wang, W.-Z. Jin, D.-W. Zhao, and X.-H. Liu, “Effect of thermomechanical controlled processing parameters on microstructure and properties of Q460q steel,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 1(17), pp. 41-46, 2010. doi: 10.1016/S1006-706X(10)60042-8.
- [7] Y. Tian, H.T. Wang, Q.B. Ye, Q.H. Wang, Z.D. Wang, and G.D. Wang, “Effect of rolling reduction below γ non-recrystallization temperature on pancaked γ -microstructure, texture and low-temperature toughness

- for hot rolled steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 794, article 139640, 2020. doi: [10.1016/j.msea.2020.139640](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139640).
- [8] Y. Zhao, J. Zheng, L. Chen, and X. Liu, “Static Recrystallization Behavior of Low-Carbon Nb-V-Microalloyed Forging Steel,” *Metals*, vol. 12, article 1745, 2022. doi: [10.3390/met12101745](https://doi.org/10.3390/met12101745).
- [9] P. Singh, S. Mula, and S.A. Ghosh, “Grain refinement, strain hardening and fracture in thermomechanically processed ultra-strong microalloyed steel,” *Materials Today Communications*, vol. 38, article 107582, 2023. doi: [10.1016/j.mtcomm.2023.107582](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107582).
- [10] S. Rešković, L. Slokar Benić, M. Lovrenić-Jugović, “The interdependence of the degree of precipitation and dislocation density during the thermomechanical treatment of microalloyed niobium steel,” *Metals*, vol. 10, article 294, 2020. doi: [10.3390/met10020294](https://doi.org/10.3390/met10020294).
- [11] V. Zurnadzhy et al., “Effect of «TMCP/Accelerated Cooling» parameters on the microstructure and mechanical properties of 40 mm thick sheets of X70 steel grade produced from heavy slabs,” *Kovove Materialy*, vol. 63(1), pp. 1-13, 2025. doi: [10.31577/km.2025.1.1](https://doi.org/10.31577/km.2025.1.1).
- [12] V. Zurnadzhy et al., “Advancing the ductile behaviour of heavy-wall API X70 pipeline steel by a «Slab/Sheet» thickness ratio increase,” *Manufacturing Technology*, vol. 24(5), pp. 843-854, 2024. doi: [10.21062/mft.2024.090](https://doi.org/10.21062/mft.2024.090).
- [13] M. Huang, Z. Li, H. Wu, B. Ning, and J. Liu, “Effect of normalizing rolling on strength-toughness and orientation distribution of typical layer of Q460 steel,” *Transactions of Materials and Heat Treatment*, vol. 42(12), pp. 102-108, 2021. doi: [10.13289/j.issn.1009-6264.2021-0263](https://doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2021-0263).
- [14] J. Markowski, B. Knapinski, B. Koczurkiewicz, H. Dyja, and A. Kawałek, “The analysis of the microstructure of steel S460NL1 in the conditions of thermo-mechanical treatment,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 25(2), pp. 61-64, 2007.
- [15] M. Banasiak et al., “Effect of Hot-Rolled Heavy Section Bars Post-Deformation Cooling on the Microstructure Refinement and Mechanical Properties of Microalloyed Steels,” *Metals*, vol. 11, article 1284, 2021. doi: [10.3390/met11081284](https://doi.org/10.3390/met11081284).
- [16] Y. Zheng et al., “Microstructure evolution and carbide precipitation behavior of microalloyed TS800TB steel during hot rolling and coiling processes,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 840, article 142902, 2022. doi: [10.1016/j.msea.2022.142902](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142902).

СТАБІЛІЗАЦІЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ ТОВСТИХ ПЛИТ ІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАРОК СТАЛЕЙ КОРИГУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ НОРМАЛІЗУЮЧОЇ ПРОКАТКИ

Чабак Ю.Г.	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3743-7428 , e-mail: chabak_y_g@gmail.com ;
Сілі І.І.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6603-2174 , e-mail: sili_i_i@pstu.edu ;
Єфременко Б.В.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0438-6433 , e-mail: efremenko_b_v@pstu.edu ;
Ставровська В.Є.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: stavrovskaya_v_e@pstu.edu ;
Сагіров Р.І.	ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3575-8324 , e-mail: ruslan.sagirov1970@gmail.com ;
Єфременко В.Г.	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4537-6939 , e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu

Стаття присвячена вирішенню важливого технічного завдання, пов'язаного із забезпеченням стабільності механічних властивостей товстолистового конструкційного прокату (плит товщиною 51-100 мм), виготовленого за енергозбережною технологією нормалізуючої прокатки (НП). Хоча НП покликана замінити традиційну об'ємну нормалізацію шляхом подрібнення мікроструктури безпосередньо в процесі деформації, практичне застосування часто виявляє нестабільність показників низькотемпературної ударної в'язкості. Значна частина продукції не відповідає мінімальним вимогам щодо енергії поглинання (27 Дж при -20°C), що зумовлює потребу в дороговартісних повторних випробуваннях або додатковій термічній обробці. У даному дослідженні вивчається складний взаємозв'язок між термомеханічними параметрами прокатки, еволюцією мікроструктури та

хімічним складом для стабілізації якості сталей марки S355, мікролегованих Nb, V та Ti. Методологія дослідження ґрунтується на аналізі автоматизованих протоколів прокатки, які фіксують зусилля у кожному проході та інтервали охолодження, – у зіставленні з результатами випробувань на ударний згин за Шарпі та даними оптичної мікроскопії. Дослідженням встановлено, що визначальним фактором для досягнення високої в'язкості є ступінь деформаційної «проробки» структури на чистовій стадії прокатки. Експериментальні дані доводять, що для плит товщиною від 55 до 100 мм сумарний ступінь обтиснення на чистовій стадії має становити не менше 15-20% для забезпечення ефективної рекристалізації аустеніту та подрібнення феритного зерна. Зокрема, встановлено, що застосування максимальних зусиль прокатки в діапазоні від 29,4 МН до 34,3 МН (3000–3500 тс) під час перших чистових проходів при 850-870°C сприяє формуванню стабільної дрібнозернистої структури «феррит+перліт» із номер зерна 8-10 згідно з ISO 643. Зниження зусиль прокатки до 13,2-16,2 МН (1350-1650 тс) призводить до утворення неоднорідної структури, що характеризується крупним зерном (№ 6-8) та наявністю бейнітних смуг поза осьової зони, через що енергія удару падає до критичних значень 3-12 Дж. Крім того, в статті кількісно оцінено вплив металургійної «чистоти» та хімічного складу на стабільність низькотемпературної ударної в'язкості. Встановлено, що «крихкі» зразки мали значно вищу кількість недеформованих силікатів (у середньому на 0,92 бала вище) порівняно із «в'язкими» зразками. Крім того виявлено взаємокомпенсуючий зв'язок між вмістом вуглецю та розміром зерна: зниження вмісту вуглецю в сталі зменшує частку перліту, тим самим підтримуючи високу енергію удару навіть за наявності укрупненого зерна фериту. За результатами дослідження розроблено вдосконалений технологічний регламент НП, виконання якого забезпечить зниження рівня браку, що гарантує якість продукції без додаткової термічної обробки.

Ключові слова: нормалізуюча прокатка, сталеві плити, низьковуглецева сталь, поглинена енергія удару, мікроструктура, феритне зерно, зусилля прокатки, неметалеві включення.

Перелік використаних джерел

- [1] Gorni A. A., Soares da Silva M. R. Microstructural evolution of the normalizing plate rolling of niobium microalloyed steels. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2015. Vol. 12(1). Pp. 72-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0750>.
- [2] Influence of the Normalizing Rolling Parameters on the Toughness of a Nb, V and Ti Microalloyed Steel Processed in the Gerdau Plate Mill / R. Faria et al. *AISTech 2019 : Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, Philadelphia, USA, 6-9 May 2019. DOI: <https://doi.org/10.33313/377/191>.
- [3] Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel / W. Xin-li et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 671. Pp. 233-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.059>.
- [4] The Physical Simulation of the Normalizing Rolling of the Steel Plate in Strength Category 350÷460 MPa / Knapinski M., Koczurkiewicz B., Kawałek A., Dyja H. *Materials Science Forum*. 2010. Vol. 638-642. Pp. 2604-2609. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.2604>.
- [5] Enhancing the tensile properties and ductile-brittle transition behavior of the EN S355 grade rolled steel via cost-saving processing routes / V. Zurnadzhy et al. *Materials*. 2024. Vol. 17. Article 1958. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091958>.
- [6] Effect of thermomechanical controlled processing parameters on microstructure and properties of Q460q steel / L. Wang et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 1(17). Pp. 41-46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60042-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60042-8).
- [7] Effect of rolling reduction below γ non-recrystallization temperature on pancaked γ -microstructure, texture and low-temperature toughness for hot rolled steel / Y. Tian et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 794. Article 139640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139640>.
- [8] Static Recrystallization Behavior of Low-Carbon Nb-V-Microalloyed Forging Steel / Zhao Y., Zheng J., Chen L., Liu X. *Metals*. 2022. Vol. 12. Article 1745. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12101745>.
- [9] Singh P., Mula S., Ghosh S. A. Grain refinement, strain hardening and fracture in thermomechanically processed ultra-strong microalloyed steel. *Materials Today Communications*. 2023. Vol. 38. Article 107582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107582>.
- [10] Rešković S., Slokar Benić L., Lovrenić-Jugović M. The interdependence of the degree of precipitation and dislocation density during the thermomechanical treatment of microalloyed niobium steel. *Metals*. 2020. Vol. 10. Article 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10020294>.
- [11] Effect of «TMCP/Accelerated Cooling» parameters on the microstructure and mechanical properties of 40 mm thick sheets of X70 steel grade produced from heavy slabs / V. Zurnadzhy et al. *Kovove Materialy*. 2025. Vol. 63(1). Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.31577/km.2025.1.1>.
- [12] Advancing the ductile behaviour of heavy-wall API X70 pipeline steel by a «Slab/Sheet» thickness ratio increase / V. Zurnadzhy et al. *Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 24(5). Pp. 843-854. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2024.090>.
- [13] Effect of normalizing rolling on strength-toughness and orientation distribution of typical layer of Q460 steel / M. Huang et al. *Transactions of Materials and*

Heat Treatment. 2021. Vol. 42(12). Pp. 102-108. DOI: <https://doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2021-0263>.

- [14] The analysis of the microstructure of steel S460NL1 in the conditions of thermo-mechanical treatment / J. Markowski et al. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007. Vol. 25(2). Pp. 61-64.

- [15] Effect of Hot-Rolled Heavy Section Bars Post-Deformation Cooling on the Microstructure Refinement and Mechanical Properties of Microalloyed Steels / M. Banasiak et al. *Metals*. 2021. Vol. 11. Article 1284. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11081284>.

- [16] Microstructure evolution and carbide precipitation behavior of microalloyed TS800TB steel during hot rolling and coiling processes / Y. Zheng et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 840. Article 142902. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142902>.

Стаття надійшла 28.09.2025

Стаття прийнята 25.10.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Stabilization of low-temperature impact toughness in heavy structural steel plates by adjusting normalizing rolling parameters / Yu. G. Chabak et al. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 93-101. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.350999>.

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.778

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351010

**ОЦІНКА ВПЛИВУ МАСШТАБНОГО ФАКТОРУ
НА РУЙНУВАННЯ ПРЯМОКУТНИХ ПРОФІЛІВ ПРИ ВОЛОЧІННІ
З ВИКОРИСТАННЯМ НОРМАЛІЗОВАНОГО КРИТЕРІЮ КОКРОФТА-ЛЕТЕМА****Таратута К.В.**канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6671-9670>, e-mail: taratutazp@gmail.com

Профілі прямокутної форми з електротехнічної міді найчастіше застосовують у кабельній промисловості та трансформаторобудуванні. Для виготовлення профілів прямокутної форми, в залежності від розміру та призначення, використовують процеси безперервного лиття, прокатки, пресування чи волочіння. В останньому випадку виготовляють прямокутні профілі малих типорозмірів, висотою від 0,1 мм до 5,0 мм, шириною від 1,0 мм до 50,0 мм. При таких сортаментах спостерігається значні відмінності геометричних параметрів найменшого профілю у порівнянні з найбільшим. Так площа перерізу найменшого профілю відрізняється від найбільшого у 2500 раз. Також слід враховувати багатократне перевищенням ширини профілю у порівнянні з товщиною. Вплив розмірів заготовки на параметри процесу волочіння, при незмінних інших технологічних параметрах, характеризується як масштабний фактор. Масштабний фактор необхідно враховувати для уникнення руйнування (обриву) заготовки в процесі волочіння, особливо при налаштуванні обладнання на новий сортament заготовок або при зміні матеріалу, що деформується. Для запобігання руйнуванню прямокутного профілю з одночасним збереженням технологічних параметрів волочіння в роботі поставлена мета визначення номінальних та критичних значень критерію Кокрофта-Летема для волочіння мідних прямокутних профілів при різних геометричних розмірах заготовки. Досягнення поставленої мети реалізовано за рахунок комп'ютерного моделювання процесу волочіння зі змінними геометричними параметрами заготовки. В процесі волочіння незмінними залишалися наступні параметри: матеріал заготовки, початкова межа плинності та витривалості матеріалу, витяжка заготовки, відносний обтиск по висоті та ширині заготовки, кут нахилу твірної волочильного інструменту, коефіцієнт тертя. Оцінка вірогідності обриву профілю здійснювалась з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема. Встановлено, що спостерігається вплив масштабного фактору на величину нормалізованого критерію Кокрофта-Летема при волочінні мідних прямокутних профілів. При волочінні мідних заготовок з встановленими постійними технологічними параметрами номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,53-0,58 для заготовок з питомою площею поверхні у осередку деформації 0,314-0,218 м²/мм³. Встановлено, що питома площа поверхні в зоні контакту заготовки з волокою відносно об'єму металу у осередку деформації зменшується зі збільшенням геометричних розмірів заготовки. Критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить від 0,7 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм 0,207 м²/мм³) до 0,85 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм 0,828 м²/мм³). Після перевищення критичного значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема починається руйнування дроту. Тобто при збільшенні геометричних розмірів заготовки (у встановленому діапазоні) вірогідність обриву збільшується. Практична значимість роботи полягає у визначенні номінальних та критичних значень нормалізованого критерію Кокрофта-Летема при волочінні мідних прямокутних профілів для оптимізації маршруту волочіння та зниження вірогідності обриву заготовки, що деформується.

Ключові слова: волочіння, прямокутний профіль, мідна заготовка, нормалізований критерій Кокрофта-Летема.

Постановка проблеми

Процес волочіння дозволяє отримати вироби з високою точністю розмірів, низькою шорсткістю та значним зміцненням матеріалу. В процесі волочіння отримують вироби з заданим профілем. Найрозповсюдженішим є суцільний та полий (трубний) круглий профіль, однак у виробництві виникає необхідність отримання фасонних профілів, таких як прямокутник, квадрат, шестигранник, трапеція. Інші форми профілів менш розповсюджені у волочильному виробництві. Профілі прямокутної форми з електротехнічної міді найчастіше застосовують у кабельній промисловості та

трансформаторобудуванні. Волочіння прямокутних профілів має ряд особливостей, пов'язаних з багатократним перевищенням ширини профілю у порівнянні з товщиною. Це призводить до необхідності більш ретельного вибору обтиску як по ширині, так і по висоті профілю. Зазвичай для запобігання коробленню з подальшим обривом профілю застосовують незначні обтиски по ширині профілю. Це призводить до неповного заповнення каналу волоки, з подальшим вільним розширенням. В результаті спостерігається коливання ширини профілю поза межами встановлених допусків.

Тому дослідження спрямовано на визначення вірогідності руйнування прямокутних профілів при волочінні заготовок однакової форми, але різних розмірів при змінному обтиску по ширині заготовки, з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В процесах обробки металів тиском для оцінки пошкоджень та руйнувань металу, що деформується, застосовуються енергетичні критерії руйнування. До найпоширеніших критеріїв відносяться: нормалізований критерій Кокрофта-Летема (Normalized Cockcroft-Latham), безпосередньо критерій Кокрофта-Летема (Cockcroft-Latham), критерій Броззо (Brozzo), критерій Айда (Ayada) та ін. [1-4].

Визначення критерія руйнування у різних дослідженнях проводилось зазвичай при виборі різних технологічних параметрах пластичної деформації [5, 6].

В роботі [7] представлено дослідження витягування труб з використанням методів верхньої межі та енергетичного методу. Процес витягування було змодельовано за допомогою програмного забезпечення ABAQUS. Результати моделювання встановили критичне значення пошкодження за критерієм руйнування Кокрофта-Летема на рівні 0,862.

В роботі [8] межу витягування труби з алюмінієвого сплаву Al-6061-T6 та еластопластичну поведінку процесу витягування досліджували на основі фундаментальних теорій значних деформацій та механіки пошкоджень. Математичне обчислювальне рівняння щодо максимального значення пошкодження Кокрофта-Летема було перетворено на відповідний дискретний вираз, який легко програмувати за допомогою коду скінченних елементів, таким чином було розроблено відповідний числовий алгоритм скінченних елементів для розрахунку пошкоджень. Завдяки підходу, який передбачає взаємну підтримку фізичних експериментів та числового моделювання для визначення критичного значення пошкодження, критерій тріщеноутворення для сплаву Al-6061-T6 був оцінений як 1,34. Отриманий критерій тріщеноутворення був введений як важливий конструктивний аспект процесу витягування труб.

Прогнозування руйнування при холодному листовому витягуванні за модифікованим критерієм Кокрофта-Летема представлено у роботах [9, 10]. У представлений роботі було проведено порівняльний аналіз різних критеріїв руйнування. У процесі листового витягування рекомендоване значення критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham для сталі 30ХГСА не має перевищувати 0,6 для забезпечення протікання процесу без руйнування. Показано, що при витягуванні заготовки діаметром 95 мм зі сталі 30ХГСА критичні пошкодження за критерієм Normalized Cockcroft-Latham знаходяться в межах 1,35...1,4.

Визначення значень критерія Кокрофта-Летема для сталі Ст.45 при гарячому формуванні з

температурою 900°C-1200°C, для оцінки вірогідності розтріскування металу, проведено у роботі [11]. Представлена методологія дослідження включає експериментальні випробування (випробування на розтяг) та числове моделювання, проведене в програмі DEFORM-3D. Встановлено, що граничне значення критерія Кокрофта-Летема коливаються у межах 0,849-0,726.

В роботі [12] встановлено, що граничне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема для титанового сплаву Ti6Al4V, сформованого за кімнатної температури, становить 0,354. Числові результати показують, що розподіл досліджуваного критерію пошкодження не є рівномірним у перерізі, де відбувається розтріскування. Його вищі значення розташовані в центральних шарах матеріалу, тоді як нижчі можна спостерігати в зовнішніх шарах перерізу.

Дослідження руйнування на розтяг міді та малоуглецевої сталі у процесі багатопрхідного волочіння з діаметрів 25,4 мм (і менше) до 11,8 мм проведено в роботі [13]. Безкиснева мідь показала ознаки того, що руйнування ініціювалося в центрі зразка. М'яка малоуглецева сталь, очевидно, також розламалася в центрі, але повний розрив відбувся одразу після того, як розтягувальне напруження досягло свого максимуму. Були досліджені теорії руйнування Кокрофта-Летема, а також Чена та Кобаяші, і було виявлено, що існує достатній збіг. Також було виявлено, що для цих конкретних випробувань критерій максимального розтягувального напруження дав більш переконливі результати.

Критерії пластичного руйнування за Кокрофтом-Летемом для кольорових матеріалів також розглянуті в роботі [14]. Нормалізовані критерії Кокрофта-Летема для стискальних випробувань проведено для двох матеріалів на основі сплаву міді – CuCrZr та алюмінієвого сплаву – ENAW7075T0. Критичний стан характеризується як стан, в якому пластична обробка завершена та починається руйнування матеріалу. Критерій пластичного руйнування за Кокрофтом-Летемом, отриманий в результаті лабораторних фізичних експериментів на стиснення, для сплаву CuCrZr становить 0,24 при кімнатній температурі.

Масштабні фактори у процесах обробки металів тиском мають складну природу виникнення та залежать від багатьох чинників, включаючи матеріал, метод обробки, температуру, швидкість деформації та ін. Тому їх детальне вивчення та облік при проектуванні та виробництві виробів мають велике значення. Вплив масштабних факторів і, як їх складової, геометричних параметрів на параметри процесів обробки металів тиском розглянуті у роботах вітчизняних та закордонних науковців [15-17]. У процесі волочіння масштабні фактори, що впливають на руйнування заготовки в процесі пластичної деформації, можна розділити на декілька груп: зміна геометричних параметрів (абсолютних розмірів), зміна технологічних параметрів, зміна напруженого стану та зміна мікроструктури металу. Зміна геометричних параметрів, у першу чергу,

пов'язана з розмірами зразків, а також з наявністю ефекту товщини металу (при деформації стрічкових профілів). Вважається, що під час пластичної деформації масштабний фактор може впливати на зміну пластичності металу та появу нерівномірності деформації [18-21].

Дослідження впливу масштабного фактору на процес руйнування профілів прямокутної форми під час волочіння у науковій літературі представлено недостатньо. У поточному дослідженні зосередимо увагу на оцінці впливу на процес волочіння прямокутних профілів зміни геометричних параметрів (абсолютних розмірів) заготовки. Тим більше, що процес волочіння профілів круглої та прямокутної форми має ряд суттєвих відмінностей як геометричних, так і технологічних.

Мета статті

Мета статті є дослідження впливу масштабного фактору на обривність (руйнування) заготовки під час волочіння прямокутних профілів при змінному обтиску по ширині заготовки, з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема.

Виклад основного матеріалу

Мідні прямокутні профілі малого перерізу найчастіше отримують двома способами. Перший спосіб включає на першому етапі прокатку профілів, а на другому етапі – процес холодного волочіння. Другий спосіб включає на першому етапі процес волочіння у ролікових волоках, а на другому етапі – процес холодного волочіння. При виробництві прямокутних профілів в якості волок використовують як монолітні твердосплавні волокни зі сплавів ВК6, ВК8, так і волокни збірної конструкції.

У поточному дослідженні обрано процес моделювання чистового етапу холодного волочіння мідних профілів у монолітній волочі з використанням програмного комплексу DEFORM. Програмний комплекс DEFORM завдяки високій достовірності отриманих результатів широко використовується при моделюванні процесу волочіння. Програма дозволяє обрати один з можливих критеріїв руйнування матеріалу, а саме: Cockcroft-Latham (критерій Кокрофта-Летема), Normalized Cockcroft-Latham (нормалізований критерій Кокрофта-Летема), McCintock (критерій МакКлінтока), Freudenthal (критерій Фредентала), Rise -Tracy (критерій Райса-Трејсі), Oyane (критерій Ояне), Oyane Negative (негативний критерій Ояне), Ayada (критерій Ойада), Ayada Negative (негативний критерій Ойада), Osacada (критерій Осакада), Brozzo (критерій Броззо), Zhao-Kuhn (критерій Чжао-Куна), max prin stress / UTS (критерій максимального головного напруження).

Критерій Cockcroft-Latham – це один з найпоширеніших критеріїв руйнування металів при пластичній деформації, який враховує накопичення енергії внаслідок пластичної деформації під дією максимального

головного напруження. Критерій припускає, що руйнування (тріщиноутворення, надрив, тощо) настає тоді, коли накопичена робота пластичної деформації під дією головного розтягуючого напруження досягає певного порогового рівня «С».

Критерій Normalized Cockcroft-Latham (NCL)- це модифікована форма оригінального критерію Cockcroft-Latham, яка використовується для оцінки руйнування матеріалу при пластичній деформації, зокрема у процесах обробки тиском (штампування, прокатка, тощо).

Критерій McCintock – цей критерій використовується для передбачення виникнення тріщин у матеріалах під час пластичної деформації. Він заснований для обліку накопичення мікроушкоджень у матеріалі, які можуть призвести до утворення та зростання тріщин.

Критерій Freudenthal – цей критерій застосовується для оцінки руйнування пластичних матеріалів, коли руйнування пов'язане з накопиченням пластичної деформації, незалежно від конкретного виду напруженого стану.

Критерій Rise -Tracy – це критерій, що враховує механізм пороутворення та зростання пор у розрахунках пластичного руйнування. Він особливо популярний у 3D-моделюванні руйнування металів, коли важливою рисою є точність при високому рівні тривісного розтягування.

Критерій Oyane – це критерій пластичного руйнування, розроблений спеціально для врахування впливу гідростатичного тиску на процес утворення тріщин у металах – особливо при обробці тиском.

Критерій Oyane Negative – це критерій, в якому враховується лише негативний (стискаючий) гідростатичний тиск при руйнуванні.

Критерій Ayada – це критерій крихкої/пружної руйнації, розроблений для листового формування, особливо ефективний при низьких триаксальності напружень.

Критерій max prin stress / UTS (Maximum Principal Stress Criterion), також відомий як критерій Ранкіна (Rankine) – цей критерій використовується для оцінки міцності матеріалів, особливо крихких, і заснований на порівнянні максимального головного напруження з тимчасовим опором розриву (UTS – Ultimate Tensile Strength).

Узагальнююча модель (розрахункова формула) для кожного критерію описані у роботах [23, 24].

Окремо слід зазначити наявність у літературі вітчизняних критеріїв руйнування, що не входять до програмних комплексів DEFORM, ABAQUS, ANSYS LS-DYNA [25-27].

Вибір одного з можливих критеріїв руйнування розглядається у наукових працях вітчизняних та закордонних вчених та залежить від багатьох чинників, основні з яких це матеріал, температура, коефіцієнт тертя та ступінь пластичної деформації [25, 28, 30- 4 та ін.].

Критерій Кокрофта-Летема рекомендується для процесів пластичної деформації, як найбільш

універсальний при різних режимах навантаження та матеріалах.

Критерій Кокрофта-Летема у загальному вигляді описується формулою (1).

$$C = \int \bar{\varepsilon} \sigma^* d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – накопичена ефективна деформація, σ^* – максимальне головне напруження.

Критерій Кокрофта-Летема (не нормалізований) представляє собою абсолютне значення максимального головного напруження.

У свою чергу, нормалізований критерій Кокрофта-Летема представляє собою відносну (безрозмірну) величину, що дозволяє зробити оцінку руйнування більш універсальною, стабільною та незалежною від конкретного процесу деформування.

Нормалізований критерій Кокрофта-Летема є показником граничної деформації металу. Він заснований на оцінці повної роботи деформації на одиницю об'єму у точці руйнування [3] та описується формулою (2):

$$C = \int \bar{\varepsilon} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (2)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – накопичена ефективна деформація, σ^* – максимальне головне напруження, $\bar{\sigma}$ – головне напруження по Мізесу.

Комп'ютерне моделювання процесу волочіння прямокутних профілів із міді марки М1 проводились при зміні ступеня деформації, від мінімальної деформації до максимальної деформації (що викликає руйнування) заготовки, при незмінній деформації по висоті заготовки.

Властивості міді марки М1 обрані із стандартизованої бази програми DEFORM-3D.

Для опису пластичної поведінки матеріалу використана розширена узагальнена модель Джонсона-Кука:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]^\alpha (D - E(T^*)^m), \quad (3)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}},$$

$$D = D_0 \cdot \exp[k(T - T_b)],$$

де ε_p – еквівалентна пластична деформація, $\dot{\varepsilon}_p$ – швидкість пластичної деформації, ε_0 – стандартна (базова) швидкість деформації, A – початковий опір матеріалу, B – коефіцієнт зміцнення деформацією, n – показник ступеня зміцнення деформацією, C – коефіцієнт залежності від швидкості деформації, α – експонента для нелінійної залежності швидкості, T – температура матеріалу, T_{room} – температура навколишнього середовища, T_{melt} – температура плавлення матеріалу, T^* – нормалізована температура, m – коефіцієнт температурного пом'якшення, D – множник для температурного пом'якшення, E – коефіцієнт, що регулює вплив температури на опір, D_0 – початкове значення D , k – коефіцієнт температурної залежності, T_b – базова температура для експоненційного закону.

Робочий інструмент (волока) представляє абсолютно тверде тіло; матеріал дроту вважається однорідним, ізотропним; середовище, що деформується, – пластичне. Температурні умови прийнято ізотермічні.

З метою визначення впливу масштабного фактору на руйнування дроту при зміні відносного обтиску по сторонам прямокутного профілю при волочінні обрані три зразка з діапазоном розмірів: по ширині від 2 мм до 8 мм, по висоті від 6 мм до 24 мм.

Причому відносний обтиск по висоті у всіх варіантах залишається постійним, а відносний обтиск по ширині профілю змінюється у відповідності до вищеписаних варіантів.

Максимальний відносний обтиск по ширині для всіх зразків становить 25%. Максимальний відносний обтиск по висоті для всіх зразків становить 20%. Максимальна витяжка для всіх заготовок $\mu = 1,67$. Кут нахилу твірної волочильного інструменту по ширині і по висоті становить для всіх зразків 10 град. Геометричні та технологічні параметри процесу волочіння відображені у табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні та технологічні параметри

№	Максимальна ширина заготовки, B_0 , мм	Мінімальна ширина заготовки, B_1 , мм	Максимальна висота заготовки, H_0 , мм	Мінімальна висота заготовки, H_1 , мм	Довжина заготовки до волочіння, L , мм.	Швидкість волочіння, мм/с	Площа поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм, $\text{мм}^2/\text{мм}^3$
1	8,0	6,0	2,5	2,0	35	0,75	0,825 - 1,252
2	16,0	12,0	5,0	4,0	70	1,50	0,425 - 0,626
3	32,0	24,0	10,0	8,0	140	3,00	0,207 - 0,314

Для поступового збільшення обтиску по ширині заготовки була змодельована заготовка ступінчастої форми, що розширюється по ширині. Загалом заготовка включала 14 ступенів по ширині та одну по висоті. При вході кожної наступної ступені у осередок деформації збільшуються технологічні параметри, а саме

витяжка, абсолютний та відносний обтиск по ширині заготовки. Це дозволяє скоротити процес моделювання та не використовувати декілька заготовок з різною витяжкою.

Для дослідження масштабного фактору, а саме впливу геометричних параметрів на руйнування

заготовки в процесі волочіння, обрано три заготовки з різними геометричними параметрами, але з однаковими параметрами деформації. Для забезпечення однакової витяжки у кожний проміжок часу для кожної з трьох заготовок встановлювалась різна швидкість волочіння. Так для найменшої заготовки з параметрами $H_1^{№1} \times B_1^{№1} = 2,0 \times 6,0$ мм швидкість волочіння складала $v_1 = 0,75$ мм/с, а для найбільшої заготовки з

параметрами $H_1^{№3} \times B_1^{№3} = 8,0 \times 24,0$ мм швидкість волочіння складала $v_1 = 3,0$ мм/с.

Коефіцієнт геометричної подібності заготовок дорівнює 2. Коефіцієнт подібності – це число, що дорівнює відношенню подібних сторін подібних фігур. Геометричні параметри заготовки №3 (найбільшої за розмірами) представлена на рис. 1.

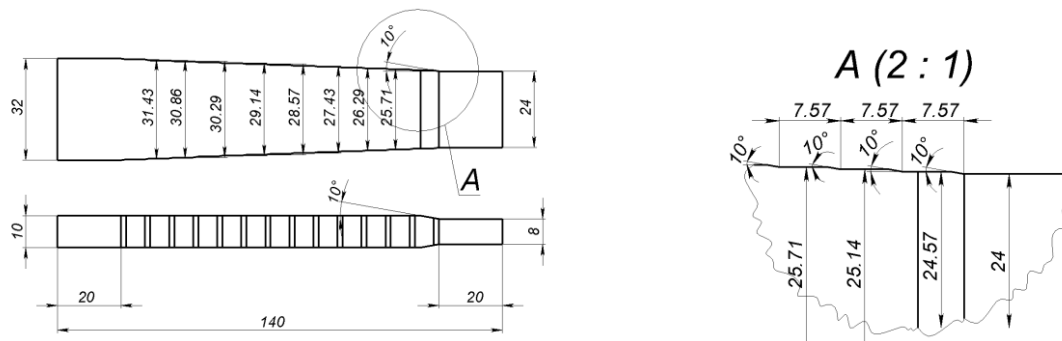
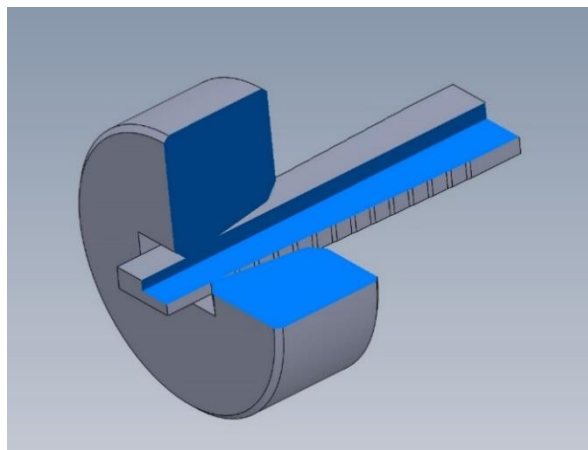


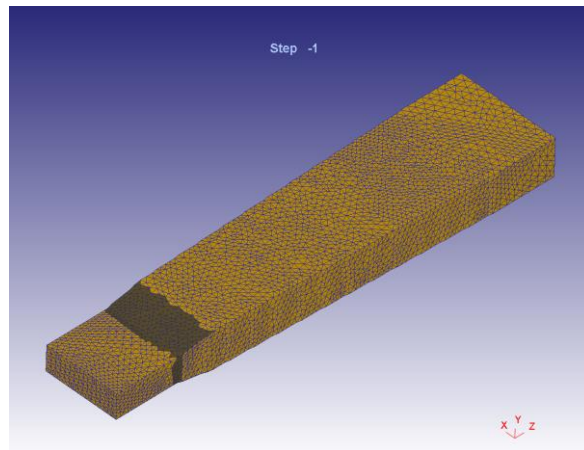
Рис. 1 – Геометричні параметри заготовки №3

Підготовка до моделювання починалась зі створення моделі трьох заготовок та трьох волок у програмі SolidWorks з подальшим збереженням у форматі STL (від англ. stereolithography) – формат файлу, який широко застосовують для зберігання тривимірних моделей об'єктів для використання в адитивних технологіях (рис. 2а). При 3D моделюванні у місці контакту

заготовки та каналу волочильного інструменту утворювалась деформаційна зона (рис. 2б). Причому розміри деформаційної зони по висоті заготовки в процесі деформації були незмінними, а по ширині заготовки збільшувались, досягаючи максимальних значень при руйнуванні заготовки.



а



б

Рис. 2 – Модель волочильного інструменту з заготовкою (секторний переріз) та зони контакту заготовки та волочильного інструменту перед деформацією: а – модель у програмі SolidWorks; б – модель заготовки у програмі DEFORM

Визначення питомої площі поверхні у осередку деформації (рис. 2б) проведено з використанням наближеної формули (4):

$$S_v^{kp} = \frac{S^{kp}}{V^{kp}}, \quad (4)$$

де S^{kp} – контактна площа поверхні заготовки у осередку деформації,

$$S^{kp} = \frac{(H_0^{kp} + H_1)(B_0^{kp} - B_1) + (B_0^{kp} + B_1)(H_0^{kp} - H_1)}{4 \cdot \tan(\alpha)};$$

H_0^{kp} , B_0^{kp} – відповідно, висота та ширина заготовки на вході у осередок деформації; H_1 , B_1 – відповідно, висота та ширина заготовки на виході з осередку деформації; α – кут нахилу твірної волочильного інструменту; V^{kp} – об'єм заготовки у осередку деформації,

$$V^{kp} = \frac{ctg(\alpha)}{12} (H_0^{kp} - H_1 + B_0^{kp} - B_1)x$$

$$x \left(H_0^{kp} B_0^{kp} + H_1 B_1 + \sqrt{H_0^{kp} B_0^{kp} \cdot H_1 B_1} \right).$$

У результаті волочіння трьох заготовок на кожному кроці відносного обтиску по ширині визначались геометричні параметри осередку деформації для кожної заготовки окремо.

Відносний обтиск по ширині заготовки визначено за формулою (5):

$$\varepsilon_B = \frac{B_0 - B_1}{B_0} 100\%, \quad (5)$$

де B_0 – ширина заготовки до волочіння, B_1 – ширина заготовки після волочіння.

Значення питомої площі поверхні у осередку деформації, розраховані за формулою (4), представлені на рис. 3.

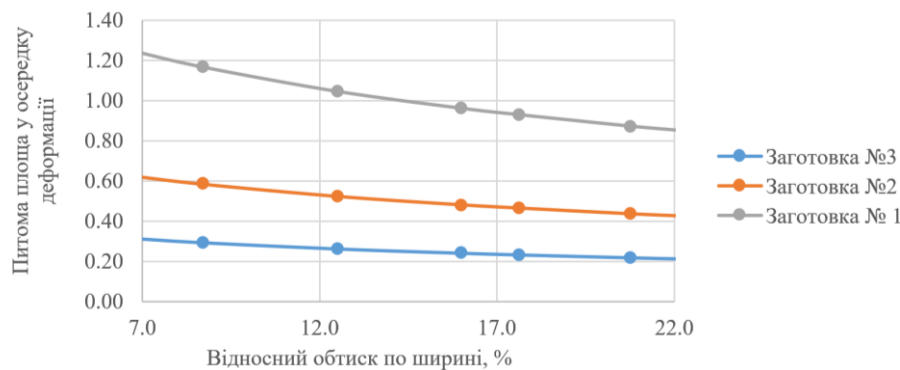


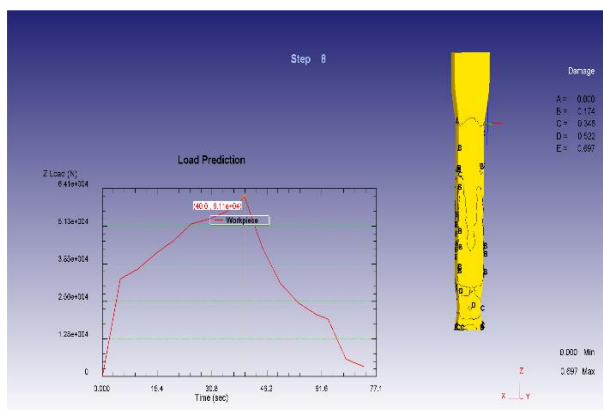
Рис. 3 – Питомої площа поверхні у осередку деформації

На рис. 4а, 5а, 6а показані графіки «зусилля-переміщення» та епюри інтенсивності зміни нормалізованого критерію Кокрофта-Летема. Зони з позначкою «А» мають найменше значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема, з подальшим зростанням до максимального значення у зонах «Е». Критичне значення критерію руйнування при моделюванні визначається на кроці, який відповідає максимальному відносному зусиллю волочіння.

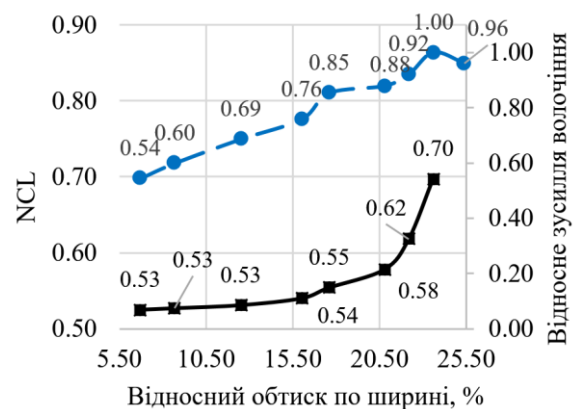
Розподіл значень критерію руйнування в залежності від збільшення відносного обтиску по ширині заготовок у процесі волочіння представлено на рис. 4б, 5б,

6б. Також на цих рисунках представлено графіки зміни відносного зусилля волочіння. Максимальне значення відносного зусилля волочіння відповідає критичному значенню нормалізованого критерію Кокрофта-Летема.

Як видно з рис. 4б, критичне значення, при якому відбувається руйнування найбільшої заготовки №3 розмірами $H_1^{№3} \times B_1^{№3} = 8,0 \times 24,0$ мм, для нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,7. Для цієї заготовки питома площа поверхні у осередку деформації (при критичному значенні нормалізованого критерію Кокрофта-Летема) складає $0,207 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.

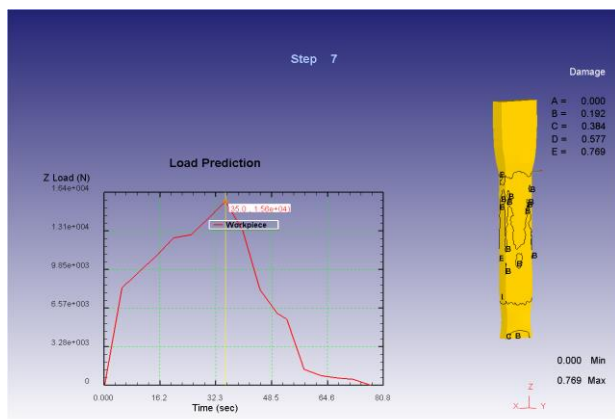


—■— нормалізований критерій Кокрофта-Летема;
—●— відносне зусилля волочіння, P_n/P_{max} .

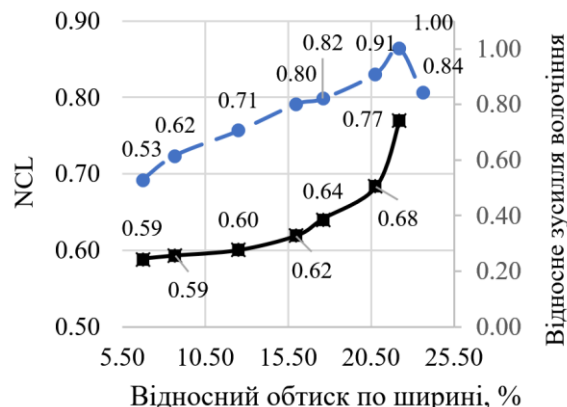


а б

Рис. 4 – Нормалізований критерій Кокрофта-Летема та відносне зусилля волочіння P_n/P_{max} заготовки №3: а – діаграма зміни зусилля волочіння та нормалізованого критерію Кокрофта-Летема; б – графік впливу відносного обтиску по ширині



— нормалізований критерій Кокрофта-Летема;
— відносне зусилля волочіння, R_n/R_{max} .

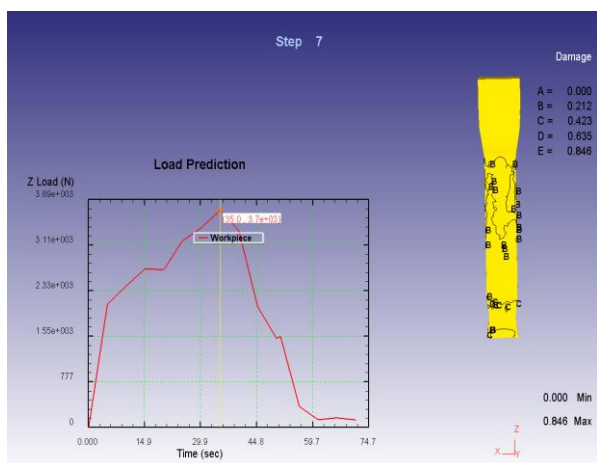


а б

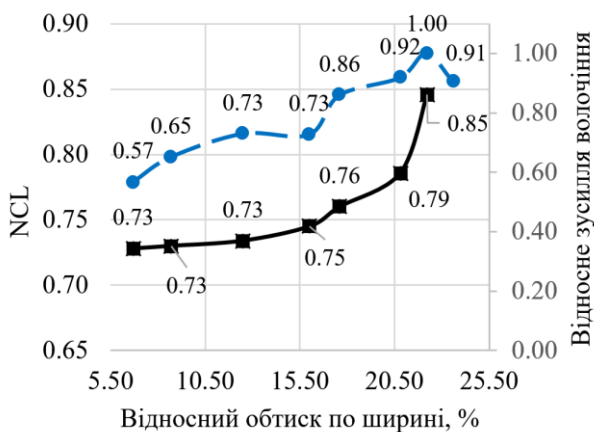
Рис. 5 – Нормалізований критерій Кокрофта-Летема та відносне зусилля волочіння R_n/R_{max} заготовки №2: а – діаграма зміни зусилля волочіння та нормалізованого критерію Кокрофта-Летема; б – графік впливу відносного обтиску по ширині

Для заготовки №2 розмірами $H_1^{№2} \times B_1^{№2} = 4,0 \times 12,0$ мм, критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,77. Для цієї заготовки питома площа поверхні у осередку деформації (при критичному значенні нормалізованого критерію Кокрофта-Летема) складає $0,425 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.

Для заготовки №1 розмірами $H_1^{№1} \times B_1^{№1} = 2,0 \times 6,0$ мм, критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,85. Для цієї заготовки питома площа поверхні у осередку деформації (при критичному значенні нормалізованого критерію Кокрофта-Летема) складає $0,828 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.



— нормалізований критерій Кокрофта-Летема;
— відносне зусилля волочіння, R_n/R_{max} .



а б

Рис. 6 – Нормалізований критерій Кокрофта-Летема та відносне зусилля волочіння R_n/R_{max} заготовки №1: а – діаграма зміни зусилля волочіння та нормалізованого критерію Кокрофта-Летема; б – графік впливу відносного обтиску по ширині

При волочінні мідних заготовок з встановленими постійними технологічними параметрами, номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить від 0,53-0,58 (для зразків з питоною площею

поверхні у осередку деформації $0,314\text{-}0,218 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$ до 0,73-0,76 (для зразків з питоною площею поверхні у осередку деформації $1,252\text{-}0,929 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$).

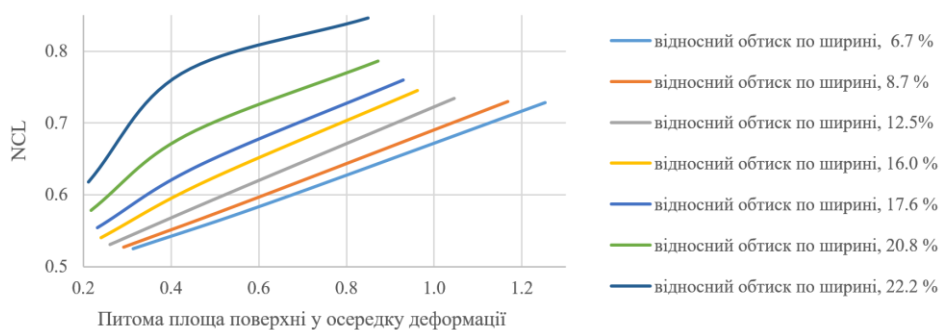


Рис. 7 – Графік впливу масштабного фактору на нормалізований критерій Кокрофта-Летема

При збільшенні розмірів зразків питома площа поверхні у осередку деформації відносно об'єму зменшується. Тобто номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема збільшується при зменшенні розміру заготовки. Це свідчить про те, що при однакових технологічних параметрах зі зменшенням геометричних розмірів заготовки вірогідність руйнування (обриву) прямокутного мідного дроту зменшується.

Отримані у дослідженні результати корелюються з роботами інших авторів щодо впливу геометричних параметрів деформованого зразка на процес волочіння. Так, у роботах [21, 22, 29] зазначається, що при зменшенні розміру дроту (за інших рівних умов) збільшується контактна площа, що припадає на об'єм деформаційної зони, що може призводити до збільшення температури металу у осередку деформації. Також масштабний фактор проявляється у тому, що при однаковому фізичному стані металу межа міцності при волочінні збільшується зі зменшенням діаметру та товщини зразка. Вплив масштабного фактору на процес волочіння стає значущим при волочінні профілів тонких та надтонких розмірів.

Значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема, отримані у поточному дослідженні, також корелюються з іншими роботами. В роботах [9, 10], для процесу листового формування, номінальні значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема визначені на рівні 0,6, а критичні пошкодження за критерієм Normalized Cockcroft-Latham знаходяться в межах 1,35...1,4 при деформації сталі 30ХГСА.

Таким чином, дослідження щодо значень нормалізованого критерію Кокрофта-Летема у процесах пластичної деформації необхідно проводити з урахуванням різних фізико-механічних властивостей матеріалів, що деформуються, та з урахуванням відмінностей у технологічних параметрах деформації.

Висновки

У ході моделювання процесу холодного волочіння виявлено вплив масштабного фактору на процес руйнування мідних профілів прямокутної форми. Було визначено залежність нормалізованого критерію

Кокрофта-Летема від масштабного фактору, що характеризується питомою площею поверхні у осередку деформації відносно об'єму заготовки у осередку деформації.

Аналіз представлених результатів показав, що при збільшенні розмірів зразків питома площа поверхні у осередку деформації відносно об'єму зменшується. Тобто менше значення питомої площі поверхні у осередку деформації (за інших рівних умов) відповідає більшим геометричним параметрам заготовки, і навпаки, зі зменшенням розміру заготовки відбувається збільшення питомої площі поверхні у осередку деформації при волочінні прямокутних профілів.

На основі розрахунків методом скінченних елементів визначено значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема у процесі волочіння прямокутних профілів. Так номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,53-0,58 для заготовок з питомою площею поверхні у осередку деформації 0,314-0,218 мм²/мм³. В свою чергу, критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить від 0,7 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм 0,207 мм²/мм³) до 0,85 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм 0,828 мм²/мм³). Після перевищення критичного значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема починається руйнування дроту. Тобто при збільшенні геометричних розмірів заготовки (у встановленому діапазоні) вірогідність обриву збільшується.

Подальші дослідження впливу масштабного фактору на обривність (руйнування) заготовки під час волочіння доцільно зосередити на врахуванні видів матеріалів, що деформуються, їх механічних властивостей та зміні технологічних параметрів під час волочіння.

Перелік використаних джерел

- [1] Bao Y., Wierzbicki T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2004. Vol. 46, no. 1. Pp. 81-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006>.

- [2] Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Краєвський В. О. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. No. 2(8). С. 56-64.
- [3] Cockcroft M. J., Latham D. J. Ductility and workability of metals. *Journal of the institute of metals*. 1968. Vol. 96. Pp. 33-39.
- [4] Di Donato S., Donati L., Negozio M. Copper Wire Multi-Pass Drawing: Process Modeling and Optimization. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 926. Pp. 499-510. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-g4wbpz>.
- [5] Damage Prediction in the Wire Drawing Process / González A., Cruchaga M., Celentano D., Ponthot J.-P. *Metals*. 2024. Vol. 14, no. 10. Article 1174. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14101174>.
- [6] Analysis of Causes of Defects Appearance in Wire Drawing / J. Švejcár et al. *Defect and Diffusion Forum*. 2020. Vol. 405. Pp. 217-222. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.405.217>.
- [7] Pouyafar V., Bolandi H., Meshkabadi R. Tube drawing analysis using upper bound and energy methods and validation by Cockcroft-Latham failure criteria. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 44, no. 1. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03302-z>.
- [8] A Study on Al-6061-T6 Tube Drawing Limit Based on Critical Damage Value / Guo Z. Q., Wang Y. X., Zhou J., Chen B. *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 102-104. Pp. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.102-104.69>.
- [9] Орлюк М. В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM. *Обробка матеріалів тиском*. 2017. № 2(45). С. 22-29.
- [10] Орлюк М. В., Піманов В. В. Використання програмного комплексу DEFORM для оптимізації операцій листового формування. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. № 1(51). С. 110-116. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)110](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)110).
- [11] Wójcik Ł., Pater Z. Comparison Analysis of Cockcroft – Latham Criterion Values of Commercial Plasticine and C45 Steel. *Acta Mechanica et Automatica*. 2018. Vol. 12, no. 4. Pp. 286-293. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0044>.
- [12] Gontarz A., Piesiak J. Determining the Normalized Cockcroft-Latham Criterion for Titanium Alloy Ti6Al4V in Tensile Testing At Room Temperature. *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM 2015)*, Barcelona, 20-21 June 2015. Article 248.
- [13] Thomsen E. G. Tensile Fracture of Drawn Copper and Mild Steel. *Journal of Engineering for Industry*. 1982. Vol. 104, no. 1. Pp. 91-96. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3185805>.
- [14] Cockcroft-Latham Ductile Fracture Criteria for Non Ferrous Materials / T. Kvačák et al. *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 782. Pp. 373-378. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.782.373>.
- [15] Juul K. J., Nielsen K. L., Niordson C. F. Steady-state numerical modeling of size effects in micron scale wire drawing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 25. Pp. 163-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.005>.
- [16] Al-Tamimi A., Darvizeh R., Davey K. Scaling of metal forming processes. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. Pp. 1069-1074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1132>.
- [17] Kukhar V. V., Grushko A. V., Vishtak I. V. Shape Indexes for Dieless Forming of the Elongated Forgings with Sharpened End by Tensile Drawing with Rupture. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 408-415. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.408>.
- [18] Chan W. L., Fu M. W., Yang B. Study of size effect in micro-extrusion process of pure copper. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, no. 7. Pp. 3772-3782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.045>.
- [19] Scale effects in metal-forming friction and lubrication / Nielsen P. S., Paldan N. A., Caloon M., Bay N. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2011. Vol. 225, no. 9. Pp. 924-931. DOI: <https://doi.org/10.1177/1350650111405254>.
- [20] Numerical Modelling and Mechanical Characterization of Pure Aluminium 1050 Wire Drawing for Symmetric and Axisymmetric Plane Deformations / O. M. Ikumapayi et al. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2020. Vol. 7, no. 4. Pp. 539-548. DOI: <https://doi.org/10.18280/mmep.070405>.
- [21] Ніколаєв В. О. Технологія волочіння металу. Навчальний посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 2003. 155 с.
- [22] Огородніков В. А., Співак О. Ю., Грушко О. В. Деформація волочінням і фізико-механічні властивості тонких термодіагностичних дротів : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 112 с.
- [23] Ступицький В. В. Аналіз та вибір критерію локального руйнування під час імітаційного моделювання процесів різання у системі DEFORM 2D. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2012. № 729. С. 107-115.
- [24] Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стищенні : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 180 с.
- [25] Грушко О.В., Огородніков В. А., Слободянюк Ю. О. Деформовність маловуглецевого дротів процесі його багатоступінчастого холодного волочіння. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. Вип. 144, № 3. С. 103-110.

- DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-103-110>.
- [26] Грушко О. В., Кириця І. Ю. Критерії деформовності з врахуванням властивостей матеріалу в параметрі напруженого стану. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. № 1(51). С. 30-37. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)30](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)30).
- [27] Лінійні та нелінійні моделі в теорії підсумовування пошкоджень / Михалевич В. М., Добрянюк В. Ю., Тютюнник О. І., Колісник М. А. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 100-108. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)100](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)100).
- [28] Використання критеріїв руйнування програмного комплексу DEFORM для аналізу процесів витягування / Огрудков Я. А., Максимів І. М., Застеба М. О., Орлюк М. В. *Інновації молоді в машинобудуванні* : збірка праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 19-30 травня 2020 р. № 2. С. 409-414.
- [29] Wang C., Guo B., Shan D. Friction related size-effect in microforming – a review. *Manufacturing Review*. 2014. Vol. 1. Article 23. DOI: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2014022>.
- [30] Grushko A. V., Kukhar V. V., Slobodyanyuk Y. O. Phenomenological Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. Pp. 114-123. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.265.114>.
- [31] Теоретичне визначення міцності композитного матеріалу в умовах всебічного стиснення / Білодєдєнко С.В., Іщенко А.О., Рассохін Д.О., Бем Р. *Теорія і практика металургії*. 2024. № 2. С. 60-69. DOI: <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2024.09>.
- [32] Основи механіки руйнування. Навчальний посібник / Маборода В. С., Бобіна М. М., Лоскутова Т. В., Мініцька Н. В. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 124 с.
- [33] Долгов О. М. Механіка руйнування: підручник. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 166 с.
- [34] Кириця І. Ю. Феноменологічні критерії руйнування. *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*. 2022. Вип. 309, № 3. С. 75-81. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-75-81>.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE SCALE FACTOR ON THE DESTRUCTION OF RECTANGULAR PROFILES DURING DRAWING USING THE NORMALIZED COCKROFT-LATHAM CRITERION

Taratuta K.V.

PhD (Engineering), associate professor, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6671-9670>, e-mail: taratutazp@gmail.com

Rectangular profiles made of electrical copper are most often used in the cable industry and transformer construction. For the manufacture of rectangular profiles, depending on the size and purpose, continuous casting, rolling, pressing or drawing processes are used. In the latter case, rectangular profiles of small standard sizes are produced, with a height of 0.1 mm to 5.0 mm, a width of 1.0 mm to 50.0 mm. With such assortments, significant differences in the geometric parameters of the smallest profile compared to the largest are observed. Thus, the cross-sectional area of the smallest profile differs from the largest by 2500 times. It should also be taken into account that the profile width is many times greater than the thickness. The influence of the workpiece dimensions on the parameters of the drawing process, with other technological parameters unchanged, is characterized as a scale factor. The scale factor must be taken into account to avoid the destruction (breakage) of the workpiece during the drawing process, especially when adjusting the equipment to a new range of workpieces or when changing the deformable material. To prevent the destruction of a rectangular profile while maintaining the technological parameters of drawing, the aim of the work is to determine the nominal and critical values of the Cockcroft-Latham criterion for drawing copper rectangular profiles with different geometric dimensions of the workpiece. The achievement of this goal was achieved through computer modeling of the drawing process with variable geometric parameters of the workpiece. During the drawing process, the following parameters remained unchanged: workpiece material, initial yield strength and toughness of the material, workpiece extraction, relative crimping along the height and width of the workpiece, the angle of inclination of the generating drawing tool, friction coefficient. The probability of profile breakage was assessed using the normalized Cockcroft-Latham criterion. It has been established that the scale factor has an effect on the value of the Normalized Cockcroft-Latham criterion during the drawing of copper rectangular profiles. When drawing copper billets with fixed technological parameters, the nominal value of the normalized Cockcroft-Latham criterion is 0.53 - 0.58 for billets with a specific surface area in the deformation center of 0,314 – 0,218 mm²/mm³. It has been established that the specific surface area in the contact zone of the billet with the drawing relative to the volume of metal in the deformation center decreases with an increase in the geometric dimensions of the billet. The critical value of the Normalized Cockcroft-Latham criterion ranges from 0.7 (for samples

with a surface area in the deformation cell per unit volume of $0,207 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$) to 0.85 (for samples with a surface area in the deformation cell per unit volume of $0,828 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$). After exceeding the critical value of the normalized Cockcroft-Latham criterion, the wire begins to break. That is, with an increase in the geometric dimensions of the workpiece (within the established range), the probability of breakage increases. The practical significance of the work lies in determining the nominal and critical values of the normalized Cockcroft-Latham criterion when drawing copper rectangular profiles to optimize the drawing route and reduce the probability of breakage of the deformed workpiece.

Keywords: drawing, rectangular profile, copper billet, Normalized Cockcroft-Latham criterion.

References

- [1] Y. Bao, and T. Wierzbicki, "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 81-98, 2004. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006](#).
- [2] V. Mykhalevych, Yu. Dobranyuk, and V. Kraevskiy, "Porivnialne doslidzhennia modelei hranychnykh plastychnykh deformatsii" ["Comparative study of border plastic deformations model's"], *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, no. 2(8), pp. 56-64, 2018. (Ukr.)
- [3] M.J. Cockcroft, and D.J. Latham, "Ductility and workability of metals," *Journal of the institute of metals*, vol. 96, pp. 33-39, 1968.
- [4] S. Di Donato, L. Donati, and M. Negrozio, "Copper Wire Multi-Pass Drawing: Process Modeling and Optimization," *Key Engineering Materials*, vol. 926, pp. 499-510, 2022. doi: [10.4028/p-g4wbpz](#).
- [5] A. González, M. Cruchaga, D. Celentano, and J.-P. Ponthot, "Damage Prediction in the Wire Drawing Process," *Metals*, vol. 14, no. 10, article 1174, 2024. doi: [10.3390/met14101174](#).
- [6] J. Švejcar, M. Juliš, L. Klakurková, P. Gejdoš, and T. Zikmund, "Analysis of Causes of Defects Appearance in Wire Drawing," *Defect and Diffusion Forum*, vol. 405, pp. 217-222, 2020. doi: [10.4028/www.scientific.net/ddf.405.217](#).
- [7] V. Pouyafar, H. Bolandi, and R. Meshkabadi, "Tube drawing analysis using upper bound and energy methods and validation by Cockcroft-Latham failure criteria," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 1, article 9, 2021. doi: [10.1007/s40430-021-03302-z](#).
- [8] Z.Q. Guo, Y.X. Wang, J. Zhou, and B. Chen, "A Study on Al-6061-T6 Tube Drawing Limit Based on Critical Damage Value," *Advanced Materials Research*, vol. 102-104, pp. 69-73, 2010. doi: [10.4028/www.scientific.net/amr.102-104.69](#).
- [9] M.V. Orliuk, "Hranychni znachennia kryteriiv ruinuvannia pry modeliuvanni protsesiv vytiahuvannia v seredovyshchi DEFORM" ["Limit values of failure criteria when modeling stretching processes in the DEFORM environment"], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 2(45), pp. 22-29, 2017. (Ukr.)
- [10] M. Orliuk, and V. Pimanov, "Vykorystannia prohramnoho kompleksu DEFORM dlia optymizatsii operatsii lystovoho formuvannia" ["Using of the DEFORM software package to optimize sheet metal forming operations"], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 1(51), pp. 110-116, 2022. doi: [10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)110](#).
- [11] Ł. Wójcik, and Z. Pater, "Comparison Analysis of Cockcroft – Latham Criterion Values of Commercial Plasticine and C45 Steel," *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 12, no. 4, pp. 286-293, 2018. doi: [10.2478/ama-2018-0044](#).
- [12] A. Gontarz, and J. Piesiak, "Determining the Normalized Cockcroft-Latham Criterion for Titanium Alloy Ti6Al4V in Tensile Testing At Room Temperature," in *Proc. of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM 2015)*, Barcelona, June 20-21, 2015, article 248.
- [13] E.G. Thomsen, "Tensile Fracture of Drawn Copper and Mild Steel," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 104, no. 1, pp. 91-96, 1982. doi: [10.1115/1.3185805](#).
- [14] T. Kvačkaj et al., "Cockcroft-Latham Ductile Fracture Criteria for Non Ferrous Materials," *Materials Science Forum*, vol. 782, pp. 373-378, 2014. doi: [10.4028/www.scientific.net/msf.782.373](#).
- [15] K.J. Juul, K.L. Nielsen, and C.F. Niordson, "Steady-state numerical modeling of size effects in micron scale wire drawing," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 163-171, 2017. doi: [10.1016/j.jmapro.2016.12.005](#).
- [16] A. Al-Tamimi, R. Darvizeh, and K. Davey, "Scaling of metal forming processes," *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 1069-1074, 2017. doi: [10.1016/j.pro-eng.2017.10.1132](#).
- [17] V.V. Kukhar, A.V. Grushko, and I.V. Vishtak, "Shape Indexes for Dieless Forming of the Elongated Forgings with Sharpened End by Tensile Drawing with Rupture," *Solid State Phenomena*, vol. 284, pp. 408-415, 2018. doi: [10.4028/www.scientific.net/ssp.284.408](#).
- [18] W.L. Chan, M.W. Fu, and B. Yang, "Study of size effect in micro-extrusion process of pure copper," *Materials & Design*, vol. 32, no. 7, pp. 3772-3782, 2011. doi: [10.1016/j.matdes.2011.03.045](#).
- [19] P.S. Nielsen, N.A. Paldan, M. Calaon, and N. Bay, "Scale effects in metal-forming friction and lubrication," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 225, no. 9, pp. 924-931, 2011. doi: [10.1177/1350650111405254](#).
- [20] O. M. Ikumapayi et al., "Numerical Modelling and Mechanical Characterization of Pure Aluminium 1050

- Wire Drawing for Symmetric and Axisymmetric Plane Deformations,” *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 7, no. 4, pp. 539-548, 2020. doi: **10.18280/mmep.070405**.
- [21] V.O. Nikolaiev, *Tekhnolohiia volochinnia metalu. Navchalnyi posibnyk* [Metal drawing technology. Textbook]. Zaporizhzhia, Ukraine: ZDIA Publ., 2003. (Ukr.)
- [22] V.A. Ohorodnikov, O.Yu. Spivak, and O.V. Hrushko, *Deformatsiia volochinniam i fizyko-mekhanichni vlastyivosti tonkykh termoparnykh drotiv : monohrafiia* [Drawing deformation and physical and mechanical properties of thin thermocouple wires: monograph]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2014. (Ukr.)
- [23] V. Stupnytskyi, “Analiz ta vybir kryteriiu lokalnoho ruinuвання під час імітаційного моделювання протесів ризання у системі DEFORM 2D” [“Analysis and selection of the local failure criterion during simulation modeling of cutting processes in the DEFORM 2D system”], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Optyimizatsiia vyrobnychkykh protsesiv i tekhnichniy kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series of Production Processes Optimization and Technical Control in Engineering and Instrumentation*, № 729, pp. 107-115, 2012. (Ukr.)
- [24] V.M. Mykhalevych, and Yu.V. Dobraniuk, *Modeliuvannya napruzhenno-deformovanoho ta hranychnoho staniv poverkhni tsylindrychnykh zrazkiv pry tortsevomu stysnenni : monohrafiia* [Modeling of stress-strain and limit states of the surface of cylindrical specimens under end compression: monograph]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2013. (Ukr.)
- [25] O.V. Grushko, V.A. Ogorodnikov, Yu.O. Slobodianiuk, “Deformovnist malovuhletsevoho drotuv protsesi yoho bahatostupinchastoho kholodnoho volochinnia” [“Deformation of Low-Carbon Wire in the Process of its Multistage Cold Drawing”], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, vol. 144, № 3, pp. 103-110, 2019. doi: **10.31649/1997-9266-2019-144-3-103-110**.
- [26] O. Hrushko, and I. Kyrytsia, “Kryterii deformovnosti z vrakhuvanniam vlastyvostei materialu v parametri napruzhenoho stanu” [“Criteria of deformity taking into account the properties of the material in the parameter of the stress state”], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 1(51), pp. 30-37, 2022. doi: **10.37142/2076-2151/2022-1(51)30**.
- [27] V. Mykhalevych, Y. Dobraniuk, O. Tiutiunyk, and M. Kolisnyk, “Liniini ta nelineini modeli v teorii pidsumovuvannya poshkodzen” [“Linear and non-linear models in damage summation theory”], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 1(53), pp. 100-108, 2024. doi: **10.37142/2076-2151/2024-1(53)100**.
- [28] Ya.A. Ohrudkov, I.M. Maksymiv, M.O. Zasteba, and M.V. Orliuk, “Vykorystannia kryteriiv ruinuвання prohrannoho kompleksu DEFORM dlia analizu protsesiv vytiahuvannya” [“Using the DEFORM software package failure criteria for the analysis of pulling processes”], in *Proc. of the XIII Int. Sci.-Techn. Conf. of Young Scientists and Students «Youth Innovations in Mechanical Engineering»*, Kyiv, Ukraine, May 19-30, 2020, № 2, pp. 409-414. (Ukr.)
- [29] C. Wang, B. Guo, and D. Shan, “Friction related size-effect in microforming – a review,” *Manufacturing Review*, vol. 1, article 23, 2014. doi: **10.1051/mfreview/2014022**.
- [30] A.V. Grushko, V.V. Kukhar, and Y.O. Slobodyanyuk, “Phenomenological Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing”, *Solid State Phenomena*, vol. 265, pp. 114-123, 2017. doi: **10.4028/www.scientific.net/ssp.265.114**.
- [31] S.V. Bilodedenko, A.O. Ischenko, D.O. Rassokhin, and R. Böhm, “Teoretychne vyznachennia mitsnosti kompozytnoho materialu v umovakh vsebichnoho stysnennia” [“Theoretical determination of the strength of composite material under conditions of comprehensive compression”], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, no. 2, pp. 60-69, 2024. doi: **10.15802/tpm.2.2024.09**.
- [32] V.S. Maboroda, M.M. Bobina, T.V. Loskutova, and N.V. Minitska, *Osnovy mekhaniky ruinuвання. Navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of Fracture Mechanics. Textbook]. Kyiv, Ukraine: NTUU «KPI» Publ., 2010. (Ukr.)
- [33] O.M. Dolhov, *Mekhanika ruinuвання: pidruchnyk* [Fracture mechanics: textbook]. Dnipro, Ukraine: NTU « Dniprovska politekhnika» Publ., 2019. (Ukr.)
- [34] I. Kyrytsia, “Fenomenolohichni kryterii ruinuвання” [“Phenomenological criteria of destruction”], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, vol. 309, № 3, pp. 75-81, 2022. doi: **10.31891/2307-5732-2022-309-3-75-81**.

Стаття надійшла 06.11.2025

Стаття прийнята 09.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Таратута К. В. Оцінка впливу масштабного фактору на руйнування прямокутних профілів при волочінні з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 102-113. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351010>.

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ ГОЛОВОК ДЛЯ ВЕРХНІХ
КОНВЕРТЕРНИХ ФУРМ

Пантейков С.П. канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0385-7603>, e-mail: ser_pant_in@ukr.net

Метою роботи є розробка верхніх дуттьових пристроїв для подачі в робочу порожнину кисневих конвертерів для виплавки сталі різних технологічних газів (кисню, азоту та інших), які забезпечують значну безпеку виробництва при їх експлуатації та мають більш високу стійкість у порівнянні з іншими конструкціями. На основі проведеного аналізу різних літературних джерел і патентного пошуку та результатів промислового випробування різних конструкцій головок (як штатних головок, так і розроблених автором раніше) до верхніх кисневих фурм була розроблена та запропонована інноваційна конструкція безпечної фурменної головки (з розробкою необхідної технічної документації для виготовлення дуттьового пристрою) для 250-т конвертерів ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (м. Кам'янське, Україна), що захищена патентом України на винахід № 78112. Результатами даної роботи вперше доведено високу ефективність розвантаження зовнішнього мідного зварного шва завдяки застосуванню в конструкції фурменної головки спеціальних зміцнюючих штифтів. Це є найбільш ефективним і необхідним заходом для підвищення безпеки експлуатації та стійкості будь-якої конструкції головки до верхньої кисневої фурми. Застосування нової безпечної конструкції фурменної головки, що описана в роботі, дозволить значно підвищити безпеку конвертерного виробництва сталі, а також збільшити стійкість головок до верхніх кисневих фурм у порівнянні з відомими конструкціями, що призведе до повного виключення можливості виникнення великих аварій у цеху через руйнування зовнішнього мідного зварного шва фурменної головки та витрат додаткових коштів на її ліквідацію. Також це дасть можливість отримати значний економічний ефект завдяки високій ефективності вирішення зазначених проблем, які завжди присутні в діючих конвертерних цехах.

Ключові слова: зміцнюючий штифт, стійкість, продувка розплаву, зварний шов, охолодна вода, аварійна ситуація, дуттьовий пристрій, конвертерний цех, економічний ефект.

Постановка проблеми

Тривалий термін служби верхньої продувальної (кисневої) фурми сприяє ритмічній та економічній роботі кисневого конвертера. Для підтримання високого терміну служби фурми критично важливе охолодження її водою, витрати якої повинні підтримуватися на рівні, що є не нижчим за проєктний. Температура охолодної води на виході з фурми не повинна перевищувати 60–65°C. Якість охолодника також є важливим параметром. Якщо вода забруднена оксидами або брудом, на внутрішніх поверхнях труб і фурменної головки зазвичай утворюються відкладення. Це негативно впливає на теплопередачу та скорочує термін служби верхньої фурми, який варіюється в залежності від умов експлуатації в кожному конкретному цеху та становить 50–1000 плавок, а іноді й більше.

Найбільш вразливою частиною верхньої фурми є так звана фурмена головка (наконечник фурми), яка в процесі експлуатації піддається впливу значних температур – понад 2000°C. При цьому висота розташування головки фурми над рідким металом критично важлива для забезпечення глибокого проникнення кисневого струменя в залізобетонцевий розплав. Однак, якщо висота фурми занадто мала, існує висока ймовірність оплавлення певних зон поверхні фурменної головки, які зазнають сильного перегріву. Тому зовнішня торцева поверхня (нижня чаша) головки верхньої фурми повинна бути виготовлена з міді, яка має високу теплопровідність, завдяки чому тепло від нагрітого торця

(нижньої чаші) головки швидко відводиться до води, що охолоджує фурму. Це може забезпечити лише кована та хімічно чиста мідь.

При цьому фурмена головка будь-якої (зварної, цільноточеної, литої, ковано-штампованої) конструкції обов'язково має зовнішній мідний зварний шов, який з'єднує мідну частину головки (нижню чашу) із сталевим зовнішнім перехідним кільцем, що необхідне для швидкої заміни головки на верхній фурмі шляхом кріплення цього кільця до стовбура (зовнішньої труби) верхньої фурми за допомогою сталевих зварних швів. Однак у процесі експлуатації верхньої фурми зазначений вище мідний зварний шов піддається розтріскуванню і, в багатьох випадках, розривається, що призводить до відриву сталевих перехідних кільць від мідної частини (нижньої мідної чаші) фурменної головки.

Тріщини та наступні розриви зовнішнього зварного з'єднання перехідного кільця з мідною частиною головки на верхніх конвертерних фурмах – серйозна проблема, яка може призвести до значних аварійних ситуацій в конвертерному цеху: верхня фурма, як ракета, виривається з конвертера, обриваючи металоплангові рукави, які підводять до неї кисень та охолодник, що також може призвести до вибуху конвертера через потрапляння значної кількості води в високотемпературну робочу порожнину агрегату.

Причини тріщиноутворення зазначеного зовнішнього мідного зварного шва можуть бути різними: дефекти металу, порушення технології зварювання та її

неправильні режими, усадкові напруги під час охолодження шва, його корозія тощо.

При цьому розрізняють чотири види тріщин: гарячі, холодні, водневі та тріщини напруги. Гарячі тріщини зазвичай виникають до завершення формування зварного шва та мають подовжню форму. Холодні тріщини утворюються після завершення процесу зварювання під час охолодження нижче температурного інтервалу 100-150°C або впродовж подальшого часу; відносяться до найбільш небезпечних дефектів і за всіма діючими нормативно-технологічними документами є неприпустимими. Водневі тріщини пов'язані з наявністю в зварному шві водню, який сприяє підвищенню крихкості металу. Тріщини напруги виникають через температурний, механічний або термомеханічний вплив на матеріал зварного шва в процесі експлуатації дуттьового пристрою.

Для запобігання утворенню перших трьох видів тріщин необхідно: суворе дотримання технології та режимів зварювання; здійснення контролю якості металу деталей та зварних швів; використання зварювальних матеріалів з низьким вмістом водню; проведення термічної обробки зварних швів; застосування антикорозійних захисних покриттів зварних швів.

Застосування всіх зазначених заходів повинно практично повністю виключити ризик тріщиноутворення зварних швів на верхніх кисневих фурмах і забезпечити надійну та безпечну роботу пристроїв.

Однак навіть при дотриманні всіх зазначених вимог (що практично неможливо в умовах виробництва) ризик виникнення тріщин у зварних швах дуже великий через те, що верхня фурма піддається значним термічним навантаженням та вібраціям під час її експлуатації, працюючи в агресивному високотемпературному середовищі (при цьому це стосується як верхніх кисневих (продувальних), так і верхніх гарнісажних (роздувальних) фурм кисневих конвертерів). Це сприяє неминучому виникненню (накопиченню) напруг в конструкції верхньої фурми при її нагріванні через температурне подовження зовнішньої труби (стовбура) верхньої фурми та недосконалості її компенсаційних пристроїв, що призводить до виникнення тріщин напруги в зварних швах через їх меншу товщину та нижчу міцність у порівнянні з іншими зонами зварюваних частин конструкції верхньої фурми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення техніко-економічних показників роботи будь-якого конвертерного цеху та експлуатаційних характеристик технологічного обладнання (в тому числі й верхніх кисневих фурм) передбачає розробку та експлуатацію верхніх багатосоплових дуттьових пристроїв.

Висока температура рідкої ванни, утворення факелів полум'я внаслідок окислення вуглецю при продувці розплаву технічно чистим киснем, розбрикування рідких шлаку і металу, а також наявність факелів

допалювання СО відхідних газів до CO_2 створюють у робочому просторі конвертера окислювальну атмосферу з високими температурами [1]. Вона чинить агресивний вплив на матеріали та складові частини верхньої фурми, зокрема на її головку [2].

Робота верхнього продувального пристрою в таких несприятливих умовах зазвичай призводить до змін у мікроструктурі її вихідних матеріалів (мідь, сталь), з яких виготовлені складові частини фурми (сопла, чаші, труби), що з часом викликає втомленість металів. Це також веде до розм'якшення зварних (як мідних, так і сталевих) швів, що, в свою чергу, призводить до руйнування (зазвичай зовнішніх, а іноді й внутрішніх) зварних швів, особливо мідних [1].

З метою запобігання цим явищам були розроблені конструкції фурмених головок, у водоохолодному тракті яких досягається необхідна швидкість руху води, щоб забезпечити належне охолодження всього дуттьового пристрою [3]. Це стало можливим завдяки використанню при проектуванні та розробці конструкцій верхніх конвертерних фурм (як продувальних, так і роздувальних) інформаційно-моделюючої системи прогнозування теплового режиму верхньої кисневої фурми [4], а також методики розрахунку теплопередачі при числовому моделюванні теплового режиму гарнісажної фурми в системі прогнозування [5].

При розробці конструкцій верхніх фурм основна увага в даний час приділяється підвищенню ресурсозберігаючої ефективності процесу виплавки сталі в конвертерах за рахунок використання внутрішніх резервів процесу. У зв'язку з цим постійно розробляються різні конструкції головок для верхніх фурм, які адаптовані для допалювання СО до CO_2 , що дозволяє покращити тепловий баланс плавки, підвищити ступінь перемішування розплаву, зменшити час продувки, прискорити процес дефосфорації і знизити рівень браку придатного металу [6]. Встановлено, що при забезпеченні в конвертері умов допалювання СО до CO_2 при $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}} = 1$ температура відхідних конвертерних газів збільшується з 1800 до 2000 К [7].

Для збільшення швидкості масообміну між рідким шлаком і металом була розроблена фурма, яка самообертається та використовує як джерело енергії струмінь газу. В результаті цього швидкість масопереносу зросла більш ніж на 30% [8].

Аналіз впливу площі перерізу основного дуттьового отвору верхньої фурми та витрати дуття на параметри струменя, що заглиблюється в розплав, дозволив спроектувати та оптимізувати центральне сопло верхньої кисневої фурми для подачі газової суміші $\text{O}_2 + \text{CO}_2$ у порожнину конвертера [9]. Також було досліджено вплив витрати цієї суміші ($80\% \text{O}_2 + 20\% \text{CO}_2$) на розподіл газопорошкових струменів, що транспортують порошкоподібне вапно [10].

Для проектування та розробки профілю сопла кисневої фурми було проведено дослідження впливу спрацювання вихідної частини сопла Лавалю на характеристики струменя, що витікає з сопла, в умовах

надзвукової швидкості. Встановлено [11], що до більш швидкого зниження швидкості газових струменів, а також до більш ранньої точки їх конвергенції призводить збільшення ступеня спрацювання сопел. При цьому причини розпаду вихідних кромок сопла та можливі заходи щодо їх усунення не розглядалися.

З метою проєктування та виготовлення верхньої кисневої фурми, що забезпечує велике число Маха ($M = 2,15$ при тиску кисню $1,01$ МПа) на виході з сопла, були досліджені та проаналізовані характеристики струменя при різних тисках подаваного кисню, а також його вплив на поведінку плавильної ванни [12].

Також вивчені параметри продувки з використанням динамічної кисневої фурми в конвертері. Встановлено вплив її конструктивних особливостей (зокрема кута закручування та швидкості її обертання) на ефективність дефосфорації розплаву [13].

В рамках проєктування верхніх занурених фурм були проведені дослідження, що спрямовані на вивчення динаміки таких процесів: впровадження газу в розплав [14]; утворення і спливання бульбашок в металевій ванні [15], зокрема з використанням рентгенівської візуалізації [16]; обертання хлюпаючих хвиль в розплаві [17]. Встановлено, що на гідродинаміку сталеплавильної ванни суттєвий вплив мають в'язкі та міжфазні сили [18].

В останній час, у зв'язку із значним поширенням технології нанесення захисного шлакового гарнісажу на вогнетривку футерівку конвертерів, значно зріс інтерес до дослідження процесів роздування та спінювання рідкого кінцевого шлаку із застосуванням верхньої (продувальної або спеціальної гарнісажної) фурми. Зокрема, в роботі [19] було вивчено вплив ударного впливу дуття верхньої фурми на процес спінювання конвертерного шлаку в умовах комбінованого (верхнього та нижнього) дуття.

Як видно з проведеного літературного огляду, роботи щодо вдосконалення конструкцій верхніх конвертерних фурм з точки зору підвищення їх безпеки не проводяться, і публікації з цієї тематики повністю відсутні, хоча це є однією з найважливіших проблем, що завжди присутня в усіх працюючих конвертерних цехах. Таким чином, актуальність робіт у цьому напрямку не викликає сумнівів і вимагає швидкого та ефективного вирішення цього питання.

Мета статті

Мета роботи – розробка і дослідження інноваційної конструкції безпечної фурменої головки для усунення проблем можливих аварій і підвищення стійкості верхніх дуттьових пристроїв у діючих конвертерних цехах.

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – виплавка сталі у кисневих конвертерах з верхньою подачею кисню.

Предмет дослідження – розроблена конструкція головки для верхніх продувальних фурм, що захищена патентом України № 78112. Досліджувався вплив зміни конструкції головки фурми шляхом посилення зовнішнього мідного зварного шва, який з'єднує мідну нижню чашу із сталевим зовнішнім перехідним кільцем, на безпеку експлуатації фурмених головок та їх стійкість. Експерименти проводились на 250-тонних конвертерах, застосовувалося структуроване спостереження, вихід фурмених головок з ладу фіксувався за допомогою фотозйомки. Для графічного зображення результатів досліджень використовувалася програма MS Excel 2015.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що в процесі експлуатації верхніх конвертерних фурм в їх конструкціях виникають значні термомеханічні напружки (що викликані, в основному, явищем лінійного теплового розширення зовнішньої труби дуттьових пристроїв внаслідок зміни їх температурного стану під час продувки), які намагаються зменшити різними конструкціями компенсаційних пристроїв (сальниковими, тарілчастими, металошланговими, телескопічними, у тому числі з гумовими кільцями, та іншими), що встановлені на трубах верхніх фурм.

Однак, незважаючи на це, всі верхні фурми характеризуються низькою міцністю зовнішнього мідного зварного шва головки, що з'єднує мідний наконечник зі сталевим зовнішнім перехідним кільцем. В результаті впливу на фурму значних силових навантажень ударного характеру від застосованих кисню та охолодної води, особливо під час їх подачі, термічного подовження та повернення в початкове положення зовнішньої труби фурми, її деформації та впливу на зовнішню трубу крутих і згинальних моментів, вона може розірватися в самому слабкому місці – тобто по зовнішньому мідному зварному шву на фурменій головці, що з'єднує два різні матеріали (мідь і сталь) і, до того ж, має низьку міцність та додатково не зміцнений. Погане з'єднання різних матеріалів (мідної чаші і сталевих кільця) мідним швом, низька якість його виконання (низька щільність і висока пористість міді) і менша товщина зварного шва порівняно з товщиною самого з'єднання нижньої чаші (наконечника) з кільцем пояснюють низьку міцність зовнішнього мідного зварного шва. Крім того, зовнішній мідний зварний шов розм'якшується внаслідок впливу на нього високотемпературного середовища, а також може частково вимиватися високотемпературним агресивним газошлако-металевим середовищем. Руйнування цього зовнішнього шва може призвести до відриву нижньої чаші від зовнішньої труби або навіть до відриву всієї фурменої головки від верхньої кисневої фурми, ставши причиною великої аварії в цеху, що неодноразово траплялося в практиці діючих конвертерних цехів.

Подовження ΔL зовнішньої труби верхньої фурми при її нагріванні в процесі продувки в конвертері можна розрахувати за формулою лінійного теплового розширення, взятою з літературних джерел по компенсації теплового розширення труб, наприклад з [20]:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T,$$

де $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу труби (сталі), $^{\circ}\text{C}^{-1}$; L_0 – довжина зовнішньої труби фурми, що піддається нагріванню, м;

$\Delta T = T_{\text{тр}} - T_0$ – градієнт температур, $^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{тр}}$ – середня температура нагріву труби, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – початкова температура труби, $^{\circ}\text{C}$).

На рис. 1 зображена досліджена автором залежність величини подовження ΔL зовнішньої труби верхньої фурми (в мм) від довжини ділянки її стовбура (в м), яка піддається нагріванню в процесі продування залізовуглецевого розплаву в 250-т конвертері, та від середньої температури цього нагріву (в $^{\circ}\text{C}$).

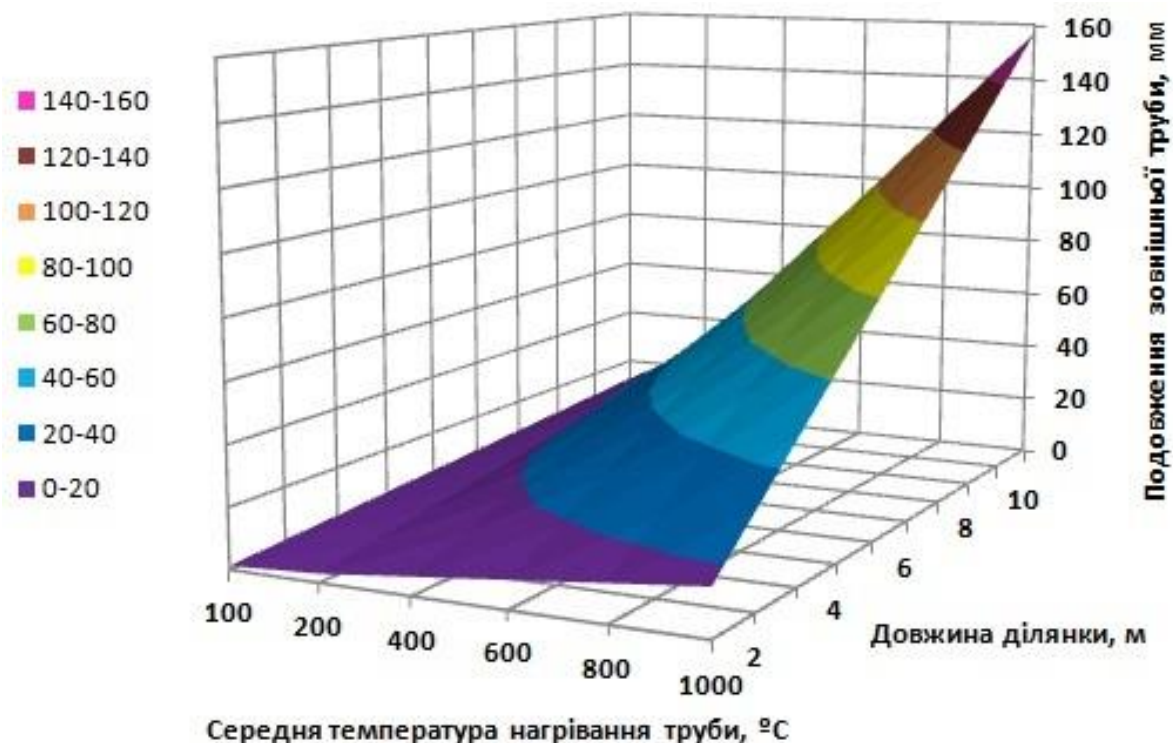


Рис. 1 – Залежність величини подовження ΔL зовнішньої труби верхньої фурми (зовнішній діаметр 426 мм) від довжини ділянки стовбура фурми, що піддається нагріванню, та від середньої температури цього нагріву

З метою підвищення безпеки експлуатації верхніх кисневих фурм і збільшення їхньої стійкості кафедрою металургії чорних металів Дніпродзержинського державного технічного університету (тепер кафедра металургії Дніпровського ГТУ) спільно з працівниками конвертерного цеху ПАТ "Дніпровський металургійний комбінат" (тепер ПрАТ «КАМЕТ-Сталь», м. Кам'янське, Україна) для 250-тонних конвертерів були розроблені нові безпечні конструкції (патент 78112 UA) фурмених головок, в яких завдяки застосуванню спеціальних зміцнюючих штифтів здійснюється посилення зовнішнього мідного зварного шва.

На рис. 2 зображені розроблені варіанти головок з різними варіантами (I–IV) конструкцій зміцнюючих штифтів (див. рис. 3), відповідно для фурм з центральною подачею кисню (рис. 2, а, б) і з центральним підведенням води (рис. 2, в, г). Фурмені головки (рис. 2, а, б – з п'ятьма соплами і конструкціями штифтів I, II; рис. 2, в, г – з шістьма соплами і конструкціями штифтів III, IV) складаються з нижньої мідної чаші

(наконечника) 1, центрального 2, проміжного 3 і зовнішнього 4 перехідних сталевих кілець, сопел 5, верхньої сталеві чаші (колектора) 6, зміцнюючих штифтів 7 (для з'єднання нижньої мідної чаші 1 і зовнішнього сталеві перехідного кільця 4 між собою), які вставлені у наскрізні отвори, що виконані в з'єднуваних деталях, і утримуються від випадання за допомогою зварного шва 8 (рис. 3, I). Крім того, мідна чаша 1 і сталеве зовнішнє кільце 4 з'єднані між собою за допомогою мідного зварного шва 9. Штифти 7 можуть бути виконані подовженими і своїми внутрішніми торцями вставлені в наскрізні (рис. 3, II) або глухі (рис. 3, III) отвори, що виконані в проміжному перехідному кільці 3 або в спеціальних накладках 10 (рис. 3, IV), які прикріплені за допомогою зварного шва 11 до зовнішньої поверхні проміжного перехідного кільця 3. Для досягнення максимальної ефективності роботи запропонованих конструкцій дуттьових пристроїв кількість зміцнюючих штифтів 7 у кожній головці повинна бути не меншою за три.

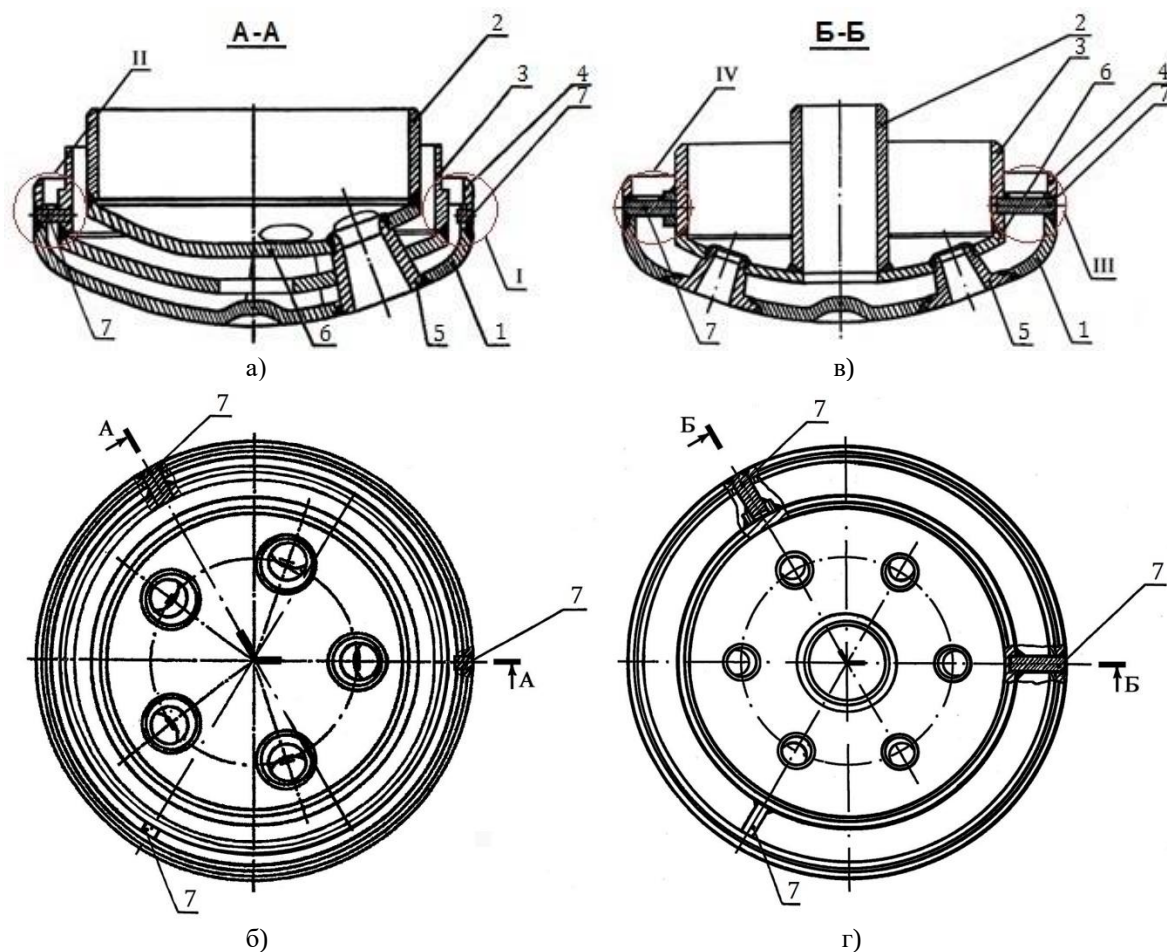


Рис. 2 – Конструкції головок для верхніх фурм з центральною подачею кисню (а, б) і води (в, г) з штифтовим посиленням зовнішнього мідного зварного шва (позначення див. в тексті статті)

При роботі головки фурми відбувається тиск дуття і охолодника на внутрішню поверхню нижньої чаші 1, а також зовнішньої труби фурми внаслідок її термічного подовження на зовнішній мідний зварний шов 9, який з'єднує зовнішнє перехідне кільце 4 з нижньою чашею 1 головки, що призводить до деформації, розтріскування і руйнування зовнішнього мідного зварного шва 9. Наявність зміцнюючих штифтів 7 в телескопічному з'єднанні нижньої чаші 1 із зовнішнім перехідним кільцем 4 (рис. 3, I) дозволяє зменшити навантаження на зовнішній зварний шов 9, оскільки в цьому випадку основне навантаження сприйматимуть штифти 7, а зварний шов 9 фактично буде лише герметизувати зазор між зазначеними з'єднуваними деталями з метою запобігання потраплянню води з верхньої фурми в порожнину конвертера.

Більш переважним є варіант конструкції, що зображений на рис. 3, II, в якому штифт 7 виготовлений подовженим і вставлений своїм внутрішнім торцем у наскрізний отвір, який виконаний у проміжному перехідному кільці 3. Однак цей варіант прийнятний тільки для конструкцій головок з центральною подачею кисню (рис. 2, а, б), оскільки в головках з центральною

подачею води (рис. 2, в, г) з'явиться можливість потрапляння води в кисневий тракт внаслідок її витoku з наскрізного отвору, що категорично неприпустимо, оскільки призведе до аварії через потрапляння води в сопла верхньої фурми.

Для фурмених головок з центральною подачею води (рис. 2, в, г) доцільно використовувати варіанти з подовженими штифтами 7 (див. рис. 3, III, IV).

На рис. 3, III показано варіант, коли зміцнюючий штифт 7 вставлений своїм внутрішнім торцем у глухий отвір, що виконаний на зовнішній поверхні проміжного перехідного кільця 3. Цей варіант передбачає використання товстостінних проміжних перехідних кілець 3, оскільки при використанні для їх виготовлення труб середньої товщини в місцях вставки штифтів 7 знижується міцність проміжного перехідного кільця 3 внаслідок зменшення його товщини при виконанні отвору. Це може призвести до порушення цілісності проміжного перехідного кільця 3 в місцях розташування отворів. Використання ж тонкостінних проміжних перехідних кілець 3 при такому варіанті конструкції неприпустимо (на рис. 3 відсутні позиції 2, 5, 6, див. рис. 2).

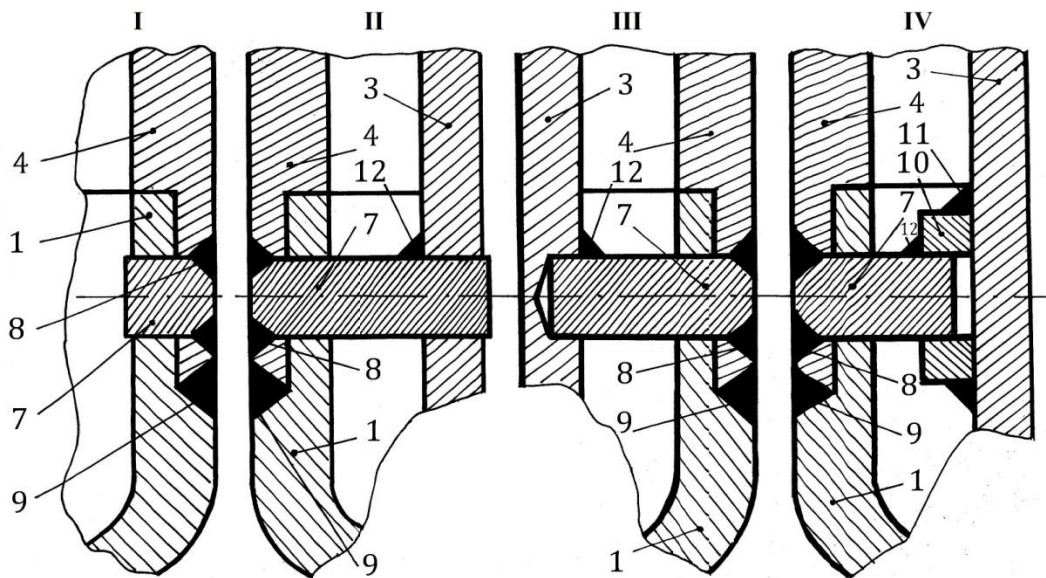


Рис. 3 – Варіанти установлення зміцнюючих штифтів у фурменних головках (позначення див. в тексті статті)

Більш безпечний варіант, який дозволяє використовувати проміжне перехідне кільце 3 з будь-якою товщиною стінки і уникнути його пошкодження, зображений на рис. 3, IV. В ньому пропонується використання спеціальних накладок 10 з отвором (наскрізним або глухим), у який вставлений зміцнюючий штифт 7 своїм внутрішнім торцем. Накладки, у свою чергу, закріплюються на зовнішній поверхні проміжного перехідного кільця 3 за допомогою суцільного зварного шва 11.

При цьому, з метою збільшення жорсткості конструкції фурменної головки, штифти 7 можуть бути додатково прикріплені за допомогою точкового зварного шва 12 до зовнішньої поверхні проміжного перехідного кільця 3 (рис. 3, II, III) або до тіла спеціальних накладок 10 (рис. 3, IV).

Таким чином, забезпечується достатнє розвантаження від термомеханічних напруг зовнішнього мідного зварного шва 9 в конструкції фурменної головки, що в підсумку підвищує її безпеку використання та

стійкість. При цьому три останні варіанти з подовженими штифтами 7, окрім того, збільшують жорсткість всієї конструкції головки за рахунок додаткового скріплення складових частин (патрубків) головки між собою, тим самим розвантажуючи і захищаючи від руйнування зварні шви навколо сопел 5 (як зовнішні, які з'єднують сопла 5 з нижньою чашею 1, так і внутрішні, які закріплюють сопла 5 в колекторі 6), що в більшій мірі підвищить стійкість фурменних головок.

На рис. 4 наведені випадки розтріскування зовнішнього мідного зварного шва після певної кількості конвертерних плавок (їх кількість вказана нижче), в результаті чого верхні продувальні фурми виходили з ладу і знімалися для проведення ремонту. Розрахунками встановлено, що міцність цього мідного зварного шва на розрив складає 40-100 МПа, що значно нижче за міцність міді високої чистоти марки М0 (210-250 МПа). Такий зварний шов практично ненадійний для відповідальних механічних конструкцій, до яких належить і верхня киснева фурма.



а)



б)



в)

Рис. 4 – Розтріскування зовнішнього мідного зварного шва (стійкість верхньої фурми:

а) – 45 плавок; б) – 62 плавки; в) – 8 плавок).

Використання варіанту I (див. рис. 3, I) установки зміцнюючих штифтів у фурменних головках дозволило значно зміцнити зовнішній мідний зварний шов (розрахункова міцність на розрив зварного з'єднання при цьому склала 400 МПа) і повністю виключити його

розтріскування, при цьому верхні фурми виходили з ладу виключно з інших причин, а саме через: розтріскування зовнішніх зварних швів навколо соплових вкладишів (сопел), перегрів вихідних ділянок дуттьових сопел Лавалля, пошкодження фурменної головки

внаслідок посадки верхньої фурми на металооброт, розтріскування внутрішніх зварних швів навколо соплових вкладишів, необхідність заміни металошлангових компенсаторів через їх пошкодження.

Продовжуються роботи з подальшої оптимізації конструкцій фурмених головок з метою подальшого підвищення їх безпеки експлуатації та збільшення стійкості, у тому числі передбачається виготовлення їх способом литтям під тиском [21] з належним контролем якості виливків [22]

Висновки

У роботі на основі проведених аналізів літературних джерел і патентного пошуку та результатів промислового випробування різних (як штатних, так і розроблених автором раніше) конструкцій головок до верхніх кисневих фурм на 250-т конвертерах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (тепер ПрАТ «КАМЕТ-Сталь», м. Кам'янське, Україна) була розроблена і запропонована інноваційна конструкція безпечної фурменої головки, що захищена патентом України на винахід № 78112.

Вперше доведена висока ефективність розвантаження зовнішнього мідного зварного шва фурменої головки завдяки встановленню в її конструкції зміцнюючих штифтів, що є єдиною дієюю та вкрай необхідною мірою для ефективного вирішення проблем безпеки експлуатації верхніх конвертерних фурм, а також низької стійкості їх головок, що завжди є присутніми в діючих конвертерних цехах.

Використання цих конструкцій забезпечує високу безпеку виробництва: що дозволяє повністю виключити ймовірність виникнення великих аварій у цеху, уникнути травм персоналу і витрат значних коштів на ліквідацію наслідків аварії, а також підвищити стійкість головок та отримати економічний ефект.

Перелік використаних джерел

- [1] Failure Analysis of Basic Oxygen Furnace Lance Head Assembly / S. K. Gupta et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020. Vol. 20. Pp. 605-612. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00866-1>.
- [2] Lim S.-M., Park S.-S., Yi, K.-W. Extension of Lance Life by Change of Height of Lances in the Smelting Furnace of Mitsubishi Process. *Metals and Materials International*. 2021. Vol. 27. Pp. 3721-3729. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00712-x>.
- [3] Panteikov S. P. Stages of Improvement for Welded Structures with Five-Nozzle Lance Heads in the Converter Shop of Public Joint Stock Company «Dneprovsky Metallurgical Combine». *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. Pp. 756-761. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091220110108>.
- [4] Zhul'kovskii O. A., Panteikov S. P., Zhul'kovskaya I. I. Information-Modeling Forecasting System for Thermal Mode of Top Converter Lance. *Steel in Translation*. 2022. Vol. 52. Pp. 495-502. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091222050138>.
- [5] Heat Transfer Calculation for Numerical Simulation of Thermal Mode of Slag-Splashing Lance in the Forecasting System / O. Zhulkovskyi et al. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems : Selected Papers of 18th International Conference, Chernihiv, Ukraine, 13-15 November 2023*. Vol. 1091. Pp. 70-81. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_6.
- [6] Dong P., Zheng S., Zhu M. Numerical Study on Gas-Metal-Slag Interaction with Single-Flow Postcombustion Oxygen Lance in the Steelmaking Process of a Top-Blown Converter. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2022. Vol. 74. Pp. 509-1520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05147-2>.
- [7] Peculiarities of Exhaust Gases Afterburning in Converter with Application of Two-Tier Oxygen Lance Blowing / E.V. Protopopov et al. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. Pp. 872-878. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091221120093>.
- [8] Effect of a self-rotating oxygen lance system on mass transfer between slag and molten steel / Gao Q., Wu W., Zhi J.-G., Zhang B., Li X.-C. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021. Vol. 28. Pp. 152-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00515-9>.
- [9] Effects of Nozzle Layout and Parameters on the Jet Characteristics of a CO₂ + O₂ Mixed Oxygen Lance / C. Feng et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 52. Pp. 425-439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02048-8>.
- [10] Influence of Carrier Gas of Converter Oxygen Lance on Smooth Distribution of O₂-CO₂-CaO Mixed Jet / W. Li et al. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020. Vol. 73. Pp. 3027-3035. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02105-5>.
- [11] Effect of Nozzle Exit Wear on the Fluid Flow Characteristics of Supersonic Oxygen Lance / C. Feng et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 51. Pp. 187-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01722-w>.
- [12] Jet Characteristics of a High-Mach-Number Oxygen-Lance Nozzle Under High Oxygen Pressure / Y. Zhang et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. Vol. 52. Pp. 4070-4081. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02325-0>.
- [13] A Numerical Study on Blowing Characteristics of a Dynamic Free Oxygen Lance Converter for Hot Metal Dephosphorization Technology Using a Coupled VOF-SMM Method / Li M., Shao L., Li Q., Zou Z. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. Vol. 52. Pp. 2026-2037. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02155-0>.
- [14] CFD Modeling and Experimental Validation of Top-Submerged-Lance Gas Injection in Liquid Metal / D. Obiso et al. *Metallurgical and Materials*

- Transactions B.* 2020. Vol. 51. Pp. 1509-1525. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01864-2>.
- [15] Determining the Bubble Dynamics of a Top Submerged Lance Smelter / A. Kandam et al. *Resource Awareness of Systems and Society / Recycling & Waste Symposium 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles*, Anaheim, USA, 27 February – 3 March 2022. Vol. I. Pp. 541-551. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5_57.
- [16] X-ray Radioscopic Visualization of Bubbly Flows Injected Through a Top Submerged Lance into a Liquid Metal / M. Akashi et al. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2020. Vol. 51. Pp. 124-139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01720-y>.
- [17] Obiso D., Reuter M., Richter A. CFD Investigation of Rotational Sloshing Waves in a Top-Submerged-Lance Metal Bath. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2021. Vol. 52. Pp. 2386-2394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02182-x>.
- [18] Bubble Formation and Surface Sloshing in the TSL Flow with a Viscous Liquid / L. Cao et al. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society.* 2022. Vol. 74. Pp. 4920-4929. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05539-y>.
- [19] Physical Modeling of Slag Foaming in Combined Top and Bottom Blowing Converter / R. Wang et al. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society.* 2022. Vol. 74. Pp. 151-158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04984-5>.
- [20] Єршомін О. Компенсація теплового розширення труб. URL: <https://aw-therm.com.ua/articles/details/655> (дата звернення: 10.09.2025).
- [21] Vacuum Technology for Magnesium Alloys During Die Casting of Radiators / O. Stalnichenko et al. *Advanced Manufacturing Processes VI : Selected Papers from the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024)*, Odesa, Ukraine, 10-13 September 2024. Pp. 220-229. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_20.
- [22] Study of the Laws of Random Fluctuations in the Parameters of Foundry Processes and the Quality of Castings / O. Ponomarenko et al. *Innovations in Mechanical Engineering IV : Conference proceedings*, Prague, Czech Republic, 18-20 June 2025. Pp. 402-411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_36.

ENHANCING THE OPERATIONAL SAFETY OF TIP DESIGNS FOR TOP CONVERTER LANCES

Panteikov S.P.

PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0385-7603>, e-mail: ser_pant_in@ukr.net

The primary objective of this study is to develop advanced top-blowing devices for the injection of various technological gases (such as oxygen, nitrogen, and others) into the working chambers of oxygen converters used in steel production. These devices are crucial for ensuring operational safety and offer greater durability when compared to conventional designs. Through an extensive review of literature, patent searches, and industrial trials of different lance tip configurations (including both standard tips and those previously developed by the author), an innovative design of a safe lance tip has been developed and proposed for the 250-ton converters at PJSC "Dniprovsky Metallurgical Combine" (Kamianske city, Ukraine). Along with this design, comprehensive technical documentation for manufacturing the lance device has been prepared. This design is protected by Patent No. 78112 UA. The findings of this research highlight, for the first time, the effectiveness of reducing stress on the external copper welded joint by incorporating specialized reinforcing pins within the lance tip structure. This measure stands as the most efficient and crucial method to improve the safety and lifespan of any top-oxygen lance tip design. The adoption of this new safe lance tip design, as outlined in this study, is expected to greatly enhance the safety of steelmaking processes in converters and to prolong the service life of the lance tips when compared to current designs. One of the key benefits of this innovation is the complete elimination of the risk of large-scale accidents within the workshop caused by the failure of the copper welded joint of the lance tip. This not only addresses safety concerns but also reduces the significant repair costs associated with such failures. Furthermore, the proposed design offers substantial economic advantages by efficiently tackling issues commonly faced in operational converter shops. This work presents a significant advancement in the field of steelmaking, offering both improved safety and cost-effectiveness.

Keywords: reinforcing pin, durability, melt blowing, weld seam, cooling water, emergency situation, blowing device, converter shop, economic effect.

References

- [1] S.K. Gupta, A. Deva, S. Toppo, S. Srikanth, and K.K. Keshari, "Failure Analysis of Basic Oxygen

Furnace Lance Head Assembly," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3721-3729, 2021. doi: [10.1007/s12540-020-00712-x](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00712-x).

- [2] S.-M. Lim, S.-S. Park, and K.-W. Yi, "Extension of Lance Life by Change of Height of Lances in the Smelting Furnace of Mitsubishi Process," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3721-3729, 2021. doi: [10.1007/s12540-020-00712-x](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00712-x).
- [3] S.P. Panteikov, "Stages of Improvement for Welded Structures with Five-Nozzle Lance Heads in the Converter Shop of Public Joint Stock Company «Dneprovsky Metallurgical Combine»,» *Steel in Translation*, vol. 50, pp. 756-761, 2020. doi: [10.3103/S0967091220110108](https://doi.org/10.3103/S0967091220110108).
- [4] O.A. Zhul'kovskii, S.P. Panteikov, and I.I. Zhul'kovskaya, "Information-Modeling Forecasting System for Thermal Mode of Top Converter Lance," *Steel in Translation*, vol. 52, pp. 495-502, 2022. doi: [10.3103/S0967091222050138](https://doi.org/10.3103/S0967091222050138).
- [5] O. Zhulkovskiy, S. Panteikov, I. Zhulkovska, M. Kashcheev, and E. Leshchenko, "Heat Transfer Calculation for Numerical Simulation of Thermal Mode of Slag-Splashing Lance in the Forecasting System," in *Selected Papers of 18th Int. Conf. «Mathematical Modeling and Simulation of Systems»*, Chernihiv, Ukraine, November 13-15, 2023, vol. 1091, pp. 70-81. doi: [10.1007/978-3-031-67348-1_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_6).
- [6] P. Dong, S. Zheng, and M. Zhu, "Numerical Study on Gas-Metal-Slag Interaction with Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance in the Steelmaking Process of a Top-Blown Converter," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 509-1520, 2022. doi: [10.1007/s11837-021-05147-2](https://doi.org/10.1007/s11837-021-05147-2).
- [7] E.V. Protopopov, M.V. Temlyantsev, N.F. Yakushevich, V.V. Solonenko, and S.O. Safonov, "Peculiarities of Exhaust Gases Afterburning in Converter with Application of Two-Tier Oxygen Lance Blowing," *Steel in Translation*, vol. 51, pp. 872-878, 2021. doi: [10.3103/S0967091221120093](https://doi.org/10.3103/S0967091221120093).
- [8] Q. Gao, W. Wu, J.-G. Zhi, B. Zhang, and X.-C. Li, "Effect of a self-rotating oxygen lance system on mass transfer between slag and molten steel," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 28, pp. 152-159, 2021. doi: [10.1007/s42243-020-00515-9](https://doi.org/10.1007/s42243-020-00515-9).
- [9] C. Feng et al., "Effects of Nozzle Layout and Parameters on the Jet Characteristics of a CO₂ + O₂ Mixed Oxygen Lance," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 425-439, 2020. doi: [10.1007/s11663-020-02048-8](https://doi.org/10.1007/s11663-020-02048-8).
- [10] W. Li, R. Zhu, C. Feng, G. Wei, and B. Han, "Influence of Carrier Gas of Converter Oxygen Lance on Smooth Distribution of O₂-CO₂-CaO Mixed Jet," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, pp. 3027-3035, 2020. doi: [10.1007/s12666-020-02105-5](https://doi.org/10.1007/s12666-020-02105-5).
- [11] C. Feng et al., "Effect of Nozzle Exit Wear on the Fluid Flow Characteristics of Supersonic Oxygen Lance," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, pp. 187-199, 2020. doi: [10.1007/s11663-019-01722-w](https://doi.org/10.1007/s11663-019-01722-w).
- [12] Y. Zhang, C. Zhang, Y. Han, B. Wang, L. Zhu, and Q. Zhang, "Jet Characteristics of a High-Mach-Number Oxygen-Lance Nozzle Under High Oxygen Pressure," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 4070-4081, 2021. doi: [10.1007/s11663-021-02325-0](https://doi.org/10.1007/s11663-021-02325-0).
- [13] M. Li, L. Shao, Q. Li, and Z. Zou, "A Numerical Study on Blowing Characteristics of a Dynamic Free Oxygen Lance Converter for Hot Metal Dephosphorization Technology Using a Coupled VOF-SMM Method," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 2026-2037, 2021. doi: [10.1007/s11663-021-02155-0](https://doi.org/10.1007/s11663-021-02155-0).
- [14] D. Obiso et al., "CFD Modeling and Experimental Validation of Top-Submerged-Lance Gas Injection in Liquid Metal," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, pp. 1509-1525, 2020. doi: [10.1007/s11663-020-01864-2](https://doi.org/10.1007/s11663-020-01864-2).
- [15] A. Kandalam, M. Stelter, M. Reinmüller, M.A. Reuter, and A. Charitos, "Determining the Bubble Dynamics of a Top Submerged Lance Smelter," in *Proc. of the Resource Awareness of Systems and Society / Recycling & Waste Symposium: Developing Tomorrow's Technical Cycles*, Anaheim, USA, 27 February – 3 March, 2022, vol. i, pp. 541-551. doi: [10.1007/978-3-030-92563-5_57](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5_57).
- [16] M. Akashi, O. Keplinger, N. Shevchenko, S. Anders, M.A. Reuter, and S. Eckert, "X-ray Radioscopic Visualization of Bubbly Flows Injected Through a Top Submerged Lance into a Liquid Metal," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, pp. 124-139, 2020. doi: [10.1007/s11663-019-01720-y](https://doi.org/10.1007/s11663-019-01720-y).
- [17] D. Obiso, M. Reuter, and A. Richter, "CFD Investigation of Rotational Sloshing Waves in a Top-Submerged-Lance Metal Bath," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 2386-2394, 2021. doi: [10.1007/s11663-021-02182-x](https://doi.org/10.1007/s11663-021-02182-x).
- [18] L. Cao, Y. Wang, Z. Cheng, H. Wang, and G. Li, "Bubble Formation and Surface Sloshing in the TSL Flow with a Viscous Liquid," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 4920-4929, 2022. doi: [10.1007/s11837-022-05539-y](https://doi.org/10.1007/s11837-022-05539-y).
- [19] R. Wang, B. Zhang, C. Hu, C. Liu, and M. Jiang, "Physical Modeling of Slag Foaming in Combined Top and Bottom Blowing Converter," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 151-158, 2022. doi: [10.1007/s11837-021-04984-5](https://doi.org/10.1007/s11837-021-04984-5).
- [20] O. Yeromin, *Kompensatsiia teplovoho rozshyrennia trub (Compensation for thermal expansion of pipes)*. [Online]. Available: <https://aw-therm.com.ua/articles/details/655>. Accessed on: September 10, 2025.
- [21] O. Stalnichenko, T. Lysenko, O. Ponomarenko, K. Kreitser, and E. Kozishkurt, "Vacuum Technology for Magnesium Alloys During Die Casting of Radiators," in *Selected Papers from the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing*

Processes (InterPartner-2024) «Advanced Manufacturing Processes VI», Odesa, Ukraine, Sept. 10-13, 2024, pp. 220-229. doi: 10.1007/978-3-031-82746-4_20.

proceedings «Innovations in Mechanical Engineering IV», Prague, Czech Republic, June 18-20, 2025, pp. 402-411. doi: 10.1007/978-3-031-93554-1_36.

- [22] O. Ponomarenko, N. Yevtushenko, O. Akimov, V. Vasilets, and H. Lopes, “Study of the Laws of Random Fluctuations in the Parameters of Foundry Processes and the Quality of Castings,” in Conference

Стаття надійшла 15.11.2025

Стаття прийнята 27.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Пантейков С. П. Підвищення безпеки експлуатації конструкцій головок для верхніх конвертерних фурм. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 52. С. 114-123. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351012>.

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.311.1:004.032.26

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351014

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У МЕРЕЖАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Саснко Ю.Л.	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9729-4700 , e-mail: sayenko_y_l@pstu.edu ;
Любарцев В.В.	д-р філософії, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1243-9101 , e-mail: lubartsev_v_v@pstu.edu

Зростання питомої ваги відновлюваних джерел електроенергії, насамперед сонячної та вітрової генерації, у балансі сучасних електроенергетичних систем сприяє переходу до функціонування електричних мереж із децентралізованим виробництвом електроенергії. Поряд із очевидними перевагами така трансформація зумовлює підвищення складності оперативного та планового керування енергосистемами, що обумовлено стохастичним характером виробітку електроенергії та його залежністю від метеорологічних і зовнішніх факторів. Це, у свою чергу, призводить до зростання невизначеності та ризиків при формуванні договірних зобов'язань на лібералізованому ринку електроенергії. Аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень, присвячених прогнозуванню режимів функціонування мереж із децентралізованою генерацією, орієнтовані на моделювання окремих об'єктів, зокрема сонячних або вітрових електростанцій. Перспективним напрямом подолання зазначених обмежень є прогнозування режимів роботи мережі як єдиного цілісного об'єкта із застосуванням методів штучного інтелекту, зокрема нейромережевих моделей. Завдяки здатності нейронних мереж апроксимувати складні нелінійні залежності стає можливим використання не лише прямих параметрів генерації, а й опосередкованих вхідних даних, які є доступними для більшості виробників електроенергії з відновлюваних джерел. Водночас недостатньо дослідженим залишається питання комплексного врахування взаємного впливу розподілених джерел генерації та параметрів електричної мережі при коротко- та середньостроковому прогнозуванні її режимів. Метою роботи є підвищення точності прогнозування режимних параметрів електричних мереж з розподіленою генерацією на основі нейромережевого підходу з урахуванням системних ефектів. У межах даного дослідження виконано імітаційне моделювання режимів роботи електричної мережі з розподіленими джерелами генерації з різними параметрами, здійснено прогнозування її режимних параметрів із використанням нейронних мереж, а також проведено порівняльний аналіз прогнозних та фактичних значень із кількісною оцінкою точності прогнозу.

Ключові слова: децентралізована генерація, відновлювана енергетика, прогнозування режимів, імітаційне моделювання, штучні нейронні мережі, точність прогнозу.

Постановка проблеми

Енергоефективність електричних мереж і енергосистем із відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), окрім природних чинників, значною мірою залежить від режиму роботи мережі, наявності та залучення резервних генерувальних потужностей, рівня низьковольтної генерації тощо. Внаслідок цього часто виникає необхідність обмеження генерації ВДЕ за вказівкою оператора системи передачі (ОСП), особливо в літній період (за нормальних умов роботи мережі), коли обсяги сонячної генерації є максимальними. Однак, окрім недовикористання потенціалу ВДЕ, це призводить до частішого застосування вуглецевих палив для маневрування при зміні навантаження в мережі, що супроводжується збільшенням викидів забруднюючих речовин. Окрім цього, держава компенсує виробникам ВДЕ вартість електроенергії, не відпущеної до мережі через обмежувальні команди ОСП.

Прогнозування електричних навантажень є важливим процесом у плануванні розвитку електроенергетичної галузі й відіграє ключову роль у плануванні генерувальних потужностей та управлінні енергосистемою, а тому викликає зростаючий науковий інтерес. Відтак, точність прогнозування електричних навантажень має вирішальне значення для ефективного планування генерації та оптимізації режимів роботи енергосистеми.

Розвиток відновлюваних джерел енергії, особливо у малих домогосподарствах, зумовлює появу так званих мереж із розподіленою генерацією (просьюмерів). Переривчастий і мінливий характер виробництва електроенергії з таких джерел, як сонячна та вітрова енергія, може спричиняти нестабільність у мережі, що призводить до потенційних відключень і виникнення інших проблем [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нині значна кількість наукових досліджень присвячена проблематиці прогнозування виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії. Наприклад, дослідження взаємозв'язку між метеорологічними змінними та вихідною потужністю фотоелектричної станції, представлене в [2], показало тісну кореляцію між температурою, рівнем сонячної радіації та вихідною потужністю установки. Застосування методів зменшення розмірності, зокрема відбору ознак і методу головних компонент, дозволяє істотно скоротити обчислювальні витрати при збереженні високої точності моделей.

Крім того, у роботі [3] описано новий підхід до прогнозування потужності фотоелектричних станцій на основі супутникових зображень, який враховує нелінійний рух хмар. Це дає змогу точніше прогнозувати траєкторії їх переміщення. Запропонований метод дозволяє визначати характеристики хмар у будь-який заданий момент часу, що підвищує точність короткострокових прогнозів генерації.

У роботі [4] застосовано штучну нейронну мережу для прогнозування генерації електроенергії за різними метеорологічними параметрами. Результати показали, що поєднання трьох змінних – температури, точки роси та відносної вологості – забезпечує найвищу точність прогнозування.

Багато досліджень також присвячено прогнозуванню генерації вітрових електростанцій. У роботі [5] розглянуто сім методів прогнозування часових рядів швидкості вітру на основі глибинного навчання та порівняно їх результати з методом авторегресивної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA). У першому випадку мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM) продемонстрували перевагу над згортковими нейронними мережами (CNN) і гібридними підходами для 12-годинних прогнозів, тоді як у другому – методи глибинного навчання загалом перевищують точність ARIMA для довгострокових прогнозів. Попри вищу точність глибинних моделей, час, необхідний для їх навчання, є суттєво більшим порівняно з часом ідентифікації параметрів ARIMA, які визначаються лише один раз, тоді як нейронні моделі потребують багаторазового навчання та тестування для забезпечення достовірності результатів, що збільшує обчислювальні витрати.

Розвиваючи тематику використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для прогнозування генерації електроенергії на вітрових електростанціях, у роботі [6] досліджено ефективність нових моделей ШНМ. Встановлено, що зі збільшенням кількості попередніх годин, врахованих у вхідному шарі, точність прогнозування покращується, що призводить до зниження середньої абсолютної відсоткової похибки (MAPE) до 13,3%, 11,2% та 10% для різних горизонтів прогнозування.

Попри значний науковий інтерес до проблематики, більшість досліджень розглядають питання прогнозування лише для електричних навантажень окремих споживачів або для окремих відновлюваних джерел енергії – переважно сонячних і вітрових електростанцій. Такий підхід є виправданим для великих учасників енергетичного ринку, проте зі зростанням частки просьюмерів у мережі формується так звана розподілена генерація, окремі елементи якої не взаємодіють між собою та не мають можливості чи мотивації брати участь у регулюванні режимів роботи мережі [7]. Цю функцію зазвичай виконує сервісна компанія або локальний диспетчерський центр. Водночас елементи, розташовані поблизу один одного, можуть впливати на загальний режим роботи мережі, і з урахуванням основних зовнішніх чинників (здебільшого метеорологічних параметрів) можна здійснити непряму оцінку їхнього впливу на роботу енергосистеми [8].

Мета статті

Метою даного дослідження є удосконалення методів прогнозування режимів роботи електричних мереж із розподіленою генерацією. Наукова новизна роботи полягає у створенні нової методології прогнозування режимів роботи енергомереж із розподіленою генерацією на основі штучних нейронних мереж (ШНМ).

На відміну від існуючих підходів, які переважно зосереджені на прогнозуванні генерації окремих елементів мережі (сонячних і вітрових електростанцій), у цій роботі запропоновано інтегрований підхід, що враховує взаємодію елементів мережі та вплив зовнішніх чинників, зокрема метеорологічних умов.

Застосування ШНМ дозволяє підвищити точність прогнозування та оптимізувати режими роботи мережі на різних рівнях інтеграції відновлюваних джерел енергії, що сприяє більш ефективному управлінню та плануванню ресурсів енергосистеми.

Розроблена модель здатна адаптуватися до змін зовнішніх умов і забезпечувати високу точність прогнозування навіть за значної частки ВДЕ у структурі генерації, що є особливо актуальним для сучасних енергомереж із великим обсягом розподіленої генерації.

Виклад основного матеріалу

ШНМ використовують методи машинного навчання для моделювання складних взаємозв'язків між вхідними та вихідними змінними [9]. Ефективність нейронних мереж у прогнозуванні електричних навантажень виявляється у їх здатності точно моделювати та передбачати складні й мінливі закономірності споживання електроенергії. Такі мережі мають властивість автоматично виявляти та використовувати внутрішні залежності й кореляції в даних, що дозволяє їм адаптуватися до зміни зовнішніх умов, зокрема погоди, режимів роботи та споживчих звичок користувачів електроенергії.

Крім того, нейронні мережі характеризуються високою точністю прогнозування, що є надзвичайно важливим для розв'язання завдань підвищення енергоефективності та оптимізації роботи електроенергетичних систем.

Основним елементом оброблення інформації, який забезпечує роботу нейронної мережі, є нейрон. На рис. 1 наведено структурну схему моделі нейрона, яка використовується при розробленні ШНМ у даному дослідженні [9].

Модель нейрона включає такі складові:

- Синапси (з'єднувальні ланки), кожна з яких характеризується власною вагою або силою зв'язку. Зокрема, вхідний сигнал x_j на синапсі j , підключеному до нейрона k , множиться на відповідну вагу w_{kj} ;
- Суматор, що виконує агрегування вхідних сигналів, зважених за їхніми синаптичними коефіцієнтами; ці операції реалізують лінійне підсумовування;
- Функція активації, яка обмежує амплітуду вихідного сигналу нейрона;
- Зміщення b_k , яке додається до зваженої суми вхідних сигналів і дозволяє зміщувати робочу точку функції активації, збільшуючи або зменшуючи вихідний сигнал залежно від знаку цього параметра.

Математично роботу нейрона k , представленого на рис. 1, можна описати системою рівнянь [9], [10]:

$$u_k = \sum_{j=1}^m \omega_{kj} x_j, \quad (1)$$

та

$$y_k = \phi(u_k + b_k), \quad (2)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_m$ – вхідні сигнали;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ – відповідні синаптичні ваги нейрона k ;

u_k – вихід суматора, який обчислюється на основі вхідних сигналів;

b_k – зміщення;

$\phi(\cdot)$ – функція активації;

y_k – вихідний сигнал нейрона.

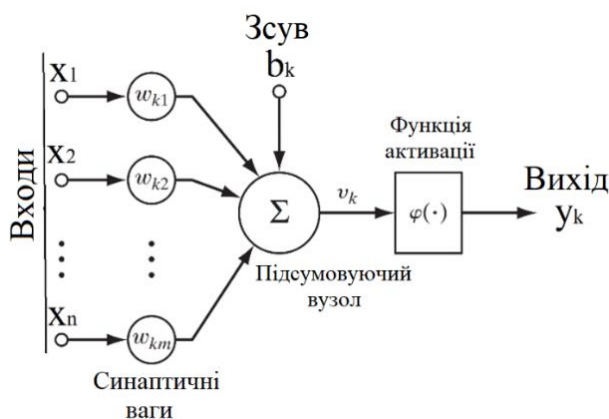


Рис. 1 – Модель штучного нейрона

Практичну доцільність застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) для прогнозування режимів роботи енергомереж було підтверджено низкою попередніх досліджень [11-13]. У цих роботах підкреслено основні переваги ШНМ – високу точність, універсальність і гнучкість. Спираючись на отримані результати, у даному дослідженні було прийнято рішення розробити модель мережі з розподіленою генерацією (МРГ) та здійснити її моделювання. Для забезпечення можливості змінювати навантаження й структуру мережі моделювання виконувалося в середовищі MATLAB/Simulink.

Згадані дослідження акцентують увагу на низькому рівні похибки прогнозування, якого можна досягти із застосуванням ШНМ, що є надзвичайно важливим для надійного прогнозування режимів роботи енергосистем. Крім того, універсальність нейронних мереж забезпечує можливість їх використання в широкому спектрі сценаріїв і умов, що робить їх особливо корисними в задачах керування енергомережами. Їхня гнучкість дозволяє адаптуватися до різноманітних зовнішніх чинників і змінних умов, підвищуючи застосовність та стійкість моделей.

У цьому контексті створення моделі МРГ мало на меті використати переваги ШНМ для досягнення більш ефективного та точного відтворення режимів роботи електричної мережі. Застосування середовища MATLAB/Simulink відіграло ключову роль у цьому процесі, оскільки воно забезпечує потужний інструментарій для моделювання складних технічних систем. Це середовище дозволяє гнучко змінювати навантаження й структурні елементи мережі, забезпечуючи динамічність і чутливість моделі до різних сценаріїв та зовнішніх умов.

Модель мережі (рис. 2) передбачає систему напругою 110 кВ, яка живиться від двох трансформаторів із потужністю $S = 16$ МВА кожен. Від першої та другої секцій шин 10 кВ живляться промислові споживачі – Industrial Load 1 (IL1) та Industrial Load 2 (IL2). Дані про навантаження цих споживачів узято з показників основних підстанцій одного з металургійних підприємств м. Маріуполь за 2021 рік. Передбачається, що промислові споживачі мають у своїх мережах власні генерувальні установки з ВДЕ: для IL1 – вітрову електростанцію потужністю 150 кВА, для IL2 – сонячну електростанцію потужністю 250 кВт.

Окрім промислових споживачів, обидві секції шин 10 кВ живлять кільце трансформаторних підстанцій, що забезпечують електропостачання побутових споживачів. Навантаження Load 1 – Load 4 підключені до двох сонячних електростанцій потужністю 30 кВт і трьох вітрових установок потужністю 5 кВт кожна – для моделювання інтеграції ВДЕ у побутовому секторі.

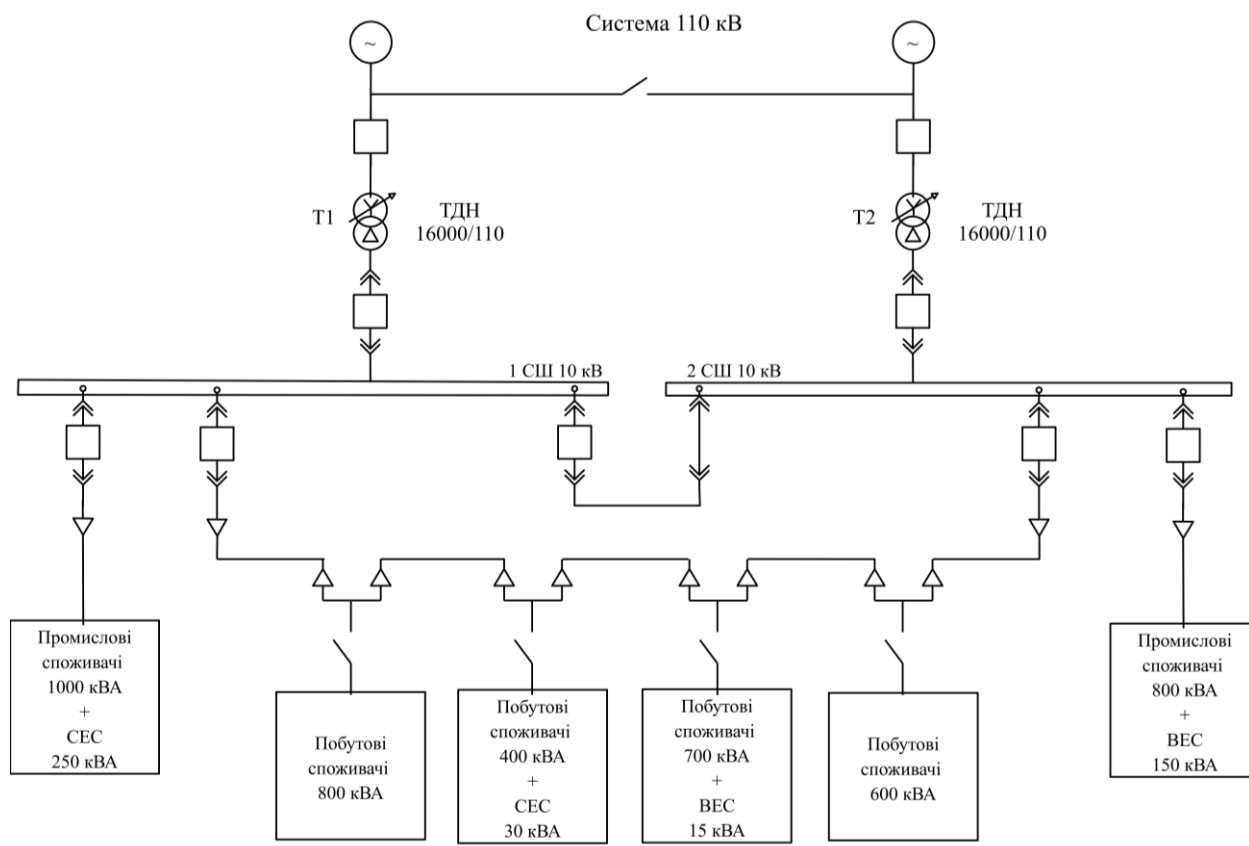


Рис. 2 – Спрощена однолінійна схема мережі з розподіленою генерацією

У таблиці 1 наведено розміри вибірки вхідних даних для нейронної мережі, а у таблиці 2 – параметри її навчання.

Таблиця 1

Розміри вибірки даних для навчання та тестування ШНМ

Загальна вибірка	Вибірка для навчання	Вибірка для тестування
90 діб (2160 годин)	60 діб (1440 годин)	30 діб (720 годин)

На рис. 3 представлена модель ШНМ для прогнозування режимів роботи МРГ.

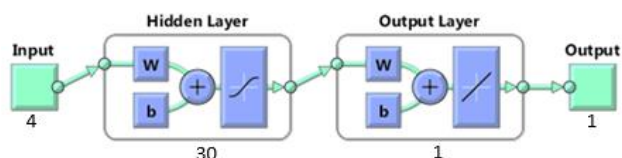


Рис. 3 – Модель штучної нейронної мережі для прогнозування режиму роботи МРГ

Після початкової фази навчання штучної нейронної мережі (ШНМ) запроваджено процес «донавчання» на свіжих даних для мінімізації похибок прогнозування в наступних операціях. Це передбачає

щоденне доповнення навчальної вибірки додатковими 24 точками даних за поточну добу. Такий підхід дозволяє враховувати чинники з тривалим часовим розподілом, зокрема сезонні коливання, зміни умов оплати для побутових ВДЕ та зміни у зовнішній мережі. Хоча ці чинники не вводяться безпосередньо в нейронну мережу, вони впливають на динаміку навантажень і можуть спричиняти збільшення похибок прогнозування. Тому їх включення у процес навчання є необхідним.

Таблиця 2

Параметри тренування ШНМ

Параметр	Значення	Опис
numHiddenNeurons	30	Кількість нейронів
net.trainFcn	'trainlm'	Алгоритм навчання (Levenberg-Marquardt)
net.performFcn	'sse'	Функція оцінки ефективності (Mean Squared Error)
maxEpochs	1000	Максимальна кількість епох навчання
minGrad	1e-5	Мінімальний градієнт

Крім того, донавчання дозволяє зменшити розмір навчальної вибірки одночасно з підвищенням точності прогнозування, особливо для непередбачуваних чинників, що впливають на режими роботи МРГ. Відповідно, ШНМ проходить динамічне навчання з надходженням нових входних даних. На рис. 4 наведено графічне відображення процесу донавчання.

Окрім розглянутих параметрів, досліджено вплив частки ВДЕ на точність прогнозування. Роботи [14],

[15] показали, що збільшення частки ВДЕ у мережі може негативно впливати на її роботу, створюючи труднощі в управлінні та диспетчеризації таких мереж. Тому важливо оцінити ефективність запропонованого підходу для прогнозування та оптимізації режимів роботи мережі за різного рівня потужності ВДЕ у енергосистемі. У таблиці 3 наведено параметри потужності та відповідні відсотки частки ВДЕ у змодельованій мережі.

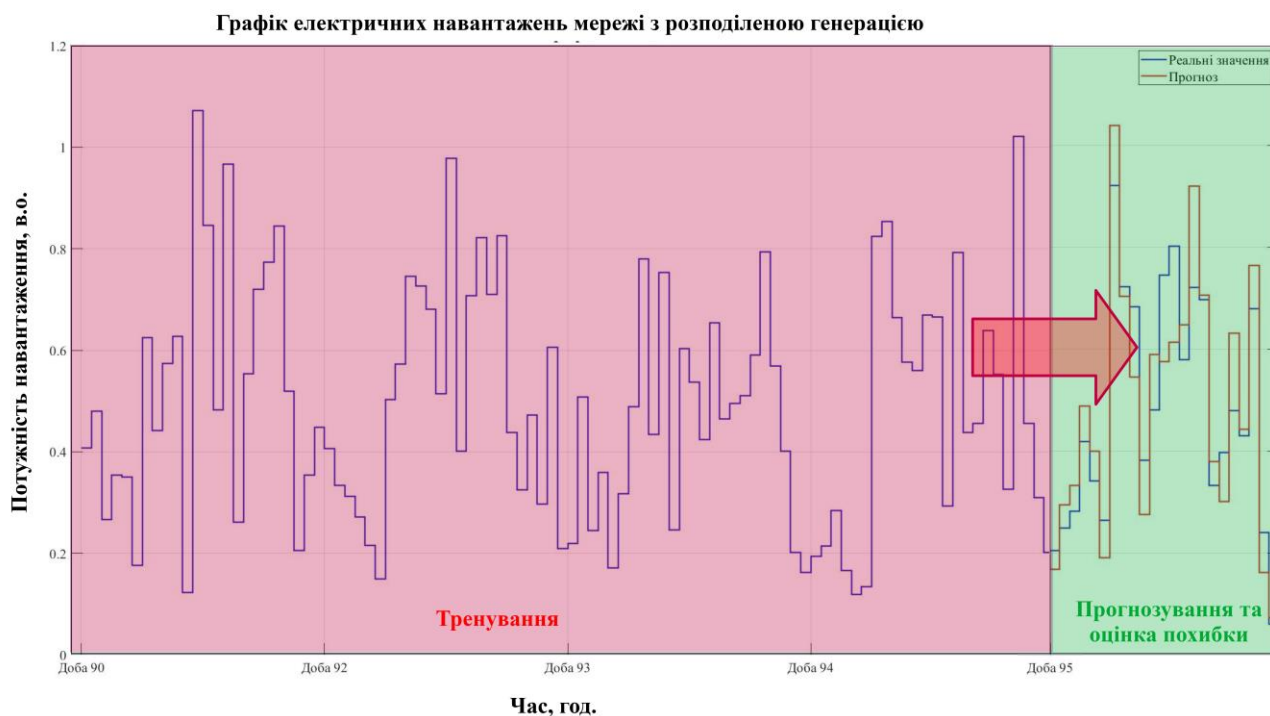


Рис. 4 – Графічна інтерпретація донавчання ШНМ протягом роботи

Таблиця 3
Варіанти часток інтеграції ВДЕ у МРГ

Відсоток інтеграції ВДЕ, %	Потужність ВЕС, кВА	Потужність СЕС, кВА	Загальна потужність ВДЕ, кВА
5	65	150	215
10	150	280	430
20	300	560	860
30	550	750	1300
40	715	1000	1720
50	900	1250	2150

Після моделювання роботи МРГ, та подальшим прогнозуванням її режимів, отримані значення середньої абсолютної відсоткової похибки (MAPE) у діапазоні від 7,67% до 10,51% для різних рівнів інтеграції ВДЕ (табл. 4). Ці результати свідчать про те, що, незважаючи на наявність певних похибок, застосування ШНМ для прогнозування роботи всієї системи МРГ є можливим без поділу мережі на окремі елементи.

Дослідження також показало, що ШНМ ефективно адаптується до різного ступеня інтеграції ВДЕ, підтримуючи лише незначне збільшення похибки прогнозування. Така адаптивність свідчить про високу здатність ШНМ враховувати мінливість, що виникає при різних рівнях ВДЕ у мережі. Можливість прогнозувати роботу МРГ комплексно, без сегментації системи на окремі складові, спрощує процес моделювання та демонструє універсальність ШНМ у керуванні складними інтегрованими енергосистемами.

Отримані результати підкреслюють потенціал ШНМ для забезпечення точних та надійних прогнозів загальної роботи МРГ, навіть за високої частки ВДЕ. Це є критично важливим для ефективного управління мережею та оптимізації розподілу електроенергії. Незначне збільшення похибки при високій інтеграції ВДЕ є допустимим компромісом, враховуючи переваги використання ШНМ для комплексного прогнозування роботи МРГ. Таким чином, застосування ШНМ у цьому контексті пропонує перспективний підхід до підвищення точності прогнозування та ефективності

експлуатації енергомереж із суттєвою участю відновлюваних джерел енергії.

Таблиця 4

Середні абсолютні похибки MAPE у % по місяцях

Частка інтеграції ВДЕ, %	Середня похибка MAPE за місяць, %
5	7,67
10	8,24
20	8,82
30	7,20
40	10,51
50	10,20

Висновки

У дослідженні розроблено методику прогнозування режимів роботи мереж із розподіленою генерацією на основі ШНМ та проаналізовано точність прогнозів для різних коефіцієнтів інтеграції ВДЕ в енергосистему. На основі результатів 30-добового прогнозу було розраховано середні абсолютні похибки, які для запропонованої моделі коливаються від 7,67% (за частки ВДЕ = 5%) до 10,51% (за частки ВДЕ = 50%).

На відміну від існуючих підходів, запропонована методика дозволяє прогнозувати режими роботи не лише окремих елементів мережі (споживачів, сонячних і вітрових електростанцій), а й функціонування всієї мережі, що забезпечує можливість оптимізації її режимів. Модель ШНМ використовує в якості вхідних параметрів як графіки навантажень попередніх періодів для різних груп споживачів, так і зовнішні метеорологічні фактори (швидкість вітру та інсоляцію), що дозволяє враховувати вплив зовнішніх умов на роботу мережі.

Запропоновані методи можуть застосовуватися для оптимізації режимів роботи мереж із розподіленою генерацією, забезпечуючи прогнозування їх режимів на основі наявних метеорологічних параметрів. Вони можуть бути особливо корисними для малих мереж та їх операторів, а також мають потенціал для масштабування на регіональний або національний рівень.

Отримані рішення в межах цього дослідження мають потенціал для подальшого розвитку у сфері прогнозування режимів роботи мереж із розподіленою генерацією, особливо з огляду на зростаючий інтерес до цієї тематики.

Перелік використаних джерел

- [1] Distributed Generation (DG): A Review / Adajah Y. Y., Thomas S., Haruna M. S., Anaza S. O. *1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS)*, Abuja, Nigeria, 15-16 July 2021. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMEAS52683.2021.9692353>.
- [2] Photovoltaic output power performance assessment and forecasting: Impact of meteorological variables / A. Ziane et al. *Solar Energy*. 2021. Vol. 220. Pp. 745-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.004>.
- [3] Photovoltaic power forecast based on satellite images considering effects of solar position / Si Z., Yang M., Yu Y., Ding T. *Applied Energy*. 2021. Vol. 302. Article 117514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117514>.
- [4] Solar PV Generation Forecast Model Based on the Most Effective Weather Parameters / M. A. Munir et al. *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, Swat, Pakistan, 24-25 July 2019. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940664>.
- [5] Pena-Gallardo R., Medina-Rios A. A comparison of deep learning methods for wind speed forecasting. *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 04-06 November 2020. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258673>.
- [6] Velazquez S. Medina and Portero U. Ajenjo. Performance Improvement of Artificial Neural Network Model in Short-term Forecasting of Wind Farm Power Output. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020. Vol. 8, no. 3. Pp. 484-490. DOI: <https://doi.org/10.35833/MPCE.2018.000792>.
- [7] Goncalves C., Bessa R. J., Pinson P. Privacy-Preserving Distributed Learning for Renewable Energy Forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2021. Vol. 12, no. 3. Pp. 1777-1787. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3065117>.
- [8] Щербина Д. Використання електричних мереж з розподіленою генерацією для збалансованого постачання електроенергії. *Modern engineering and innovative technologies*. 2023. № 29–01. С. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-042>.
- [9] Haykin S. S. *Neural networks and learning machines*. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2009. 934 p.
- [10] An overview and comparative analysis of Recurrent Neural Networks for Short Term Load Forecasting / F.M. Bianchi et al. Springer Cham, 2017. 72 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70338-1>.
- [11] Sayenko Y. Wind power forecasting based on meteorological data using neural networks. *Przegląd elektrotechniczny*. 2021. Vol. 1, no. 11. Pp. 209-212. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2021.11.39>.
- [12] Sayenko Y., Baranenko T., Liubartsev V. Forecasting of Electricity Generation by Solar Panels Using Neural Networks with Incomplete Initial Data. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 07-11 September 2020. Pp. 140-143. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263085>.

- [13] Sayenko Y., Sychenko V., Liubartsev V. Development of Methods for Optimizing Reactive Power Modes Based on Neural Network Technologies. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 98-103. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764220>.
- [14] Zhao B., Wang C., Zhang X. Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems: Analysis, Design, and Control. 1st ed. Wiley, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119187349>.
- [15] A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies / Erdiwansyah et al. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2021. Vol. 6, no. 1. Article 3. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3>.

IMPROVEMENT OF ELECTRIC LOAD FORECASTING IN DISTRIBUTED GENERATION NETWORKS USING NEURAL NETWORKS

- Sayenko Yu.** D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>, e-mail: sayenko_y_l@pstu.edu;
- Liubartsev V.** PhD, senior lecturer, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1243-9101>, e-mail: liubartsev_v_v@pstu.edu

The increasing share of renewable energy sources, primarily solar and wind generation, in the power balance of modern electric power systems has led to the transition toward networks with decentralized electricity production. Along with evident advantages, this transformation significantly complicates both operational and long-term control of power systems due to the stochastic nature of electricity generation and its dependence on meteorological and external factors. As a result, uncertainty and risks associated with contractual obligations in liberalized electricity markets are substantially increased. An analysis of existing research indicates that most studies on forecasting the operating conditions of networks with decentralized generation focus on individual components, such as solar or wind power plants. A promising approach to overcoming these limitations is the forecasting of network operating modes as an integrated system using artificial intelligence methods, particularly neural network models. Owing to their ability to approximate complex nonlinear relationships, neural networks enable the use of not only direct generation-related parameters but also indirect input data that are available to the majority of renewable energy producers. At the same time, the issue of comprehensive consideration of the mutual interaction between distributed generation units and power network parameters in short- and medium-term operating mode forecasting remains insufficiently investigated. The aim of this study is to improve the accuracy of forecasting operating parameters of electric networks with distributed generation based on a neural network approach that accounts for system-level effects. In this study, the operating modes of an electric network with distributed generation and various parameters of renewable energy units are simulated. Forecasting of network operating conditions is performed using neural networks, and a comparative analysis of predicted and actual values is carried out with a quantitative assessment of forecasting accuracy.

Keywords: decentralized generation, renewable energy, operating mode forecasting, simulation modeling, artificial neural networks, forecasting accuracy.

References

- [1] Y.Y. Adajah, S. Thomas, M.S. Haruna, and S.O. Anaza, "Distributed Generation (DG): A Review," in *Proc. of the 1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS)*, Abuja, Nigeria, July 15-16, 2021, pp. 1-5. doi: [10.1109/ICMEAS52683.2021.9692353](https://doi.org/10.1109/ICMEAS52683.2021.9692353).
- [2] A. Ziane et al., "Photovoltaic output power performance assessment and forecasting: Impact of meteorological variables," *Solar Energy*, vol. 220, pp. 745-757, 2021. doi: [10.1016/j.solener.2021.04.004](https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.004).
- [3] Z. Si, M. Yang, Y. Yu, and T. Ding, "Photovoltaic power forecast based on satellite images considering effects of solar position," *Applied Energy*, vol. 302, article 117514, 2021. doi: [10.1016/j.apenergy.2021.117514](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117514).
- [4] M.A. Munir, A. Khattak, K. Imran, A. Ulasyar, and A. Khan, "Solar PV Generation Forecast Model Based on the Most Effective Weather Parameters," in *Proc. of the Int. Conf. on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, Swat, Pakistan, 24-25 July 2019, pp. 1-5. doi: [10.1109/ICECCE47252.2019.8940664](https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940664).
- [5] R. Pena-Gallardo, and A. Medina-Rios, "A comparison of deep learning methods for wind speed forecasting," in *Proc. of the IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 04-06 November 2020, pp. 1-6. doi: [10.1109/ROPEC50909.2020.9258673](https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258673).

- [6] S. Velazquez Medina, and U. Portero Ajenjo, "Performance Improvement of Artificial Neural Network Model in Short-term Forecasting of Wind Farm Power Output," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 484-490, 2020. doi: [10.35833/MPCE.2018.000792](https://doi.org/10.35833/MPCE.2018.000792).
- [7] C. Goncalves, R.J. Bessa, and P. Pinson, "Privacy-Preserving Distributed Learning for Renewable Energy Forecasting," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 1777-1787, 2021. doi: [10.1109/TSTE.2021.3065117](https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3065117).
- [8] D. Shcherbyna, "Vykorystannia elektrychnykh merezh z rozpodilenoio heneratsiieiu dlia zbalansovanoho postachannia elektroenerhii" ["Use of electricity networks with distributed generation for balanced electricity supply"], *Modern engineering and innovative technologies*, no. 29-01, pp. 55-60, 2023. doi: [10.30890/2567-5273.2023-29-01-042](https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-042). (Ukr.)
- [9] S.S. Haykin, *Neural networks and learning machines*, 3rd ed. New York, USA: Prentice Hall, 2009.
- [10] F.M. Bianchi, E. Maiorino, M.C. Kampffmeyer, A. Rizzi, and R. Jenssen, *An overview and comparative analysis of Recurrent Neural Networks for Short Term Load Forecasting*. Springer Cham, 2017. doi: [10.1007/978-3-319-70338-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70338-1).
- [11] Y. Sayenko, "Wind power forecasting based on meteorological data using neural networks," *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 1, no. 11, pp. 209-212, 2021. doi: [10.15199/48.2021.11.39](https://doi.org/10.15199/48.2021.11.39).
- [12] Y. Sayenko, T. Baranenko, and V. Liubartsev, "Forecasting of Electricity Generation by Solar Panels Using Neural Networks with Incomplete Initial Data," in *Proc. of the IEEE 4th Int. Conf. on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 07-11 September 2020, pp. 140-143. doi: [10.1109/IEPS51250.2020.9263085](https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263085).
- [13] Y. Sayenko, V. Sychenko, and V. Liubartsev, "Development of Methods for Optimizing Reactive Power Modes Based on Neural Network Technologies," in *Proc. of the IEEE 6th Int. Conf. on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019, pp. 98-103. doi: [10.1109/ESS.2019.8764220](https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764220).
- [14] B. Zhao, C. Wang, and X. Zhang, *Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems: Analysis, Design, and Control*, 1st ed. Wiley, 2017. doi: [10.1002/9781119187349](https://doi.org/10.1002/9781119187349).
- [15] Erdiwansyah, Mahidin, H. Husin, Nasaruddin, M. Zaki, and Muhibbuddin, "A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, no. 1, article 3, 2021. doi: [10.1186/s41601-021-00181-3](https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3).

Стаття надійшла 03.11.2025

Стаття прийнята 27.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Саєнко Ю. Л., Любарцев В. В. Удосконалення прогнозування електричних навантажень у мережах із розподіленою генерацією за допомогою нейронних мереж. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 124-131. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351014>.

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ УФ-ДЕЗІНФЕКЦІЇ ВОДИ
ДЛЯ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ АКВАКУЛЬТУРНИХ УСТАНОВОК

Семенов А.О.

канд. фіз.-мат. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет,
м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>, e-mail:
asemen2015@gmail.com;

Семенова Н.В.

начальник відділу маркетингу, Полтавський ливарно-механічний завод, м. Полтава,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4495-7712>, e-mail: nvsemenova78@gmail.com

Одним із ключових завдань функціонування установок замкненого водопостачання (УЗВ) для вирощування риби є забезпечення мікробіологічної безпеки води. Серед відомих методів дезінфекції найбільш поширеними є озонування та ультрафіолетове (УФ) випромінювання, а також їхні комбінації. Проте застосування озону супроводжується низкою обмежень: токсичністю для гідробіонтів, утворенням побічних продуктів та зниженням розчиненого кисню у воді, що знижує його придатність для УЗВ. У роботі представлено результати досліджень з розробки та впровадження електротехнічної системи ультрафіолетового знезараження води, яка працює за принципом проточного опромінення із попереднім фільтруванням. Як джерело бактерицидного випромінювання застосовано лампи низького тиску з максимумом на довжині хвилі 254 нм. Експериментальні дослідження на аквафермі з вирощування осетрових показали, що використання УФ-установки сумарною потужністю 850 Вт (10 ламп низького тиску) забезпечує стабільний бактерицидний потік на рівні 220 Вт/м² та ефективну інактивацію мікроорганізмів у системах об'ємом до 80 м³. Протягом усього періоду спостережень загальне мікробне число, загальні коліформи та *E.coli* не перевищували допустимих норм, а випадків бактеріальних та грибкових захворювань риби не було зафіксовано. Розроблена електротехнічна система знезараження води дозволяє підвищити надійність і біологічну безпеку функціонування УЗВ без використання озону, є енергоефективною та придатною для масштабування у промислових аквакультурних господарствах.

Ключові слова: аквакультура, рециркуляційні системи, ультрафіолетове випромінювання, знезараження води, інактивація мікроорганізмів, електротехнічні системи.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток аквакультури в Україні та світі орієнтований на індустріальні методи інтенсивного вирощування риби в установках замкненого водопостачання (УЗВ-системи), які дозволяють мінімізувати використання природних водних ресурсів та забезпечувати стабільні умови для вирощування [1]. Проте одним з головних факторів, що визначають успішність функціонування УЗВ, є підтримання стабільної якості води, зокрема її бактеріологічної безпеки. Вода в рециркуляційних системах швидко накопичує органічні домішки, патогенні бактерії та грибки, що призводить до виникнення захворювань риб, зниження продуктивності та економічних збитків [1, 2].

Найбільш поширеними методами знезараження оборотної води є озонування та ультрафіолетове (УФ) опромінювання [3-5]. Озонування забезпечує високу ефективність знезараження завдяки окислювальним властивостям озону, проте має суттєві недоліки: токсичність для риби при перевищенні концентрацій, утворення побічних шкідливих сполук та необхідність додаткової фільтрації [5, 6]. УФ-опромінювання натовість є екологічно безпечним методом, який базується на фотохімічних реакціях нуклеїнових кислот мікроорганізмів у діапазоні 200-280 нм, що призводить до їх інактивації [4, 7, 8].

Водночас ефективність УФ-знезараження залежить від низки чинників: мутності води, наявності завислих частинок, прозорості кварцових чохлів та

стабільності параметрів роботи електротехнічної системи [9]. За даними [10], навіть при високих дозах УФ-опромінювання (75-1800 мВт/см²) залишкова кількість мікроорганізмів може зберігатися через екранування зв'язаними частинками. Це свідчить про необхідність попередньої механічної та біологічної фільтрації, а також оптимізації електротехнічної схеми та потужності ламп з врахуванням їх небезпечності при опромінюванні [11].

У сучасних аквакультурних технологіях дедалі більшої уваги набувають питання електротехнічної інтеграції систем знезараження: вибір типу ламп, їх електричне навантаження, стабілізація напруги та струму, контроль інтенсивності випромінювання та автоматизація управління процесом [1, 12]. Зокрема, лампи низького тиску з довжиною хвилі 254 нм забезпечують оптимальний бактерицидний ефект при знезараженні [13] з мінімальними енергетичними витратами [7].

Таким чином, постає проблема розробки енергоефективної електротехнічної системи УФ-знезараження води в УЗВ-системах, яка б поєднувала попереднє очищення та контроль бактерицидного потоку. Це дозволить забезпечити мікробіологічну безпеку води, знизити ризики захворювань риби та підвищити ефективність вирощування в умовах УЗВ-системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток аквакультурних господарств у всьому світі, які використовують рециркуляційні системи,

стикається з проблемою ефективності дезінфекції. Нові технологічні підходи рециркуляції в УЗВ-системах пропонують змінити традиційні способи, включаючи вдосконалення класичних процесів: попередня фільтрація від крупних частинок, біофільтрація, а також газообмінні процеси, які спрямовані на підтримання оптимальних умов для вирощування риби [1].

Вибір технології та обладнання для очищення оборотної води має ключове значення в умовах інтенсивної експлуатації систем замкненого водопостачання (УЗВ). Саме цей етап визначає стабільність усього технологічного процесу вирощування риби. З огляду на це, науковці активно розробляють та вдосконалюють безреагентні методи очищення, які забезпечують ефективну інактивацію мікроорганізмів без утворення токсичних побічних сполук, шкідливих для гідробіонтів [2].

У працях [1, 5] розглянуто рециркуляційні системи інтенсивного рибництва, де вода проходить послідовне очищення через механічні фільтри для видалення твердих частинок, біофільтри з нітрифікуючими бактеріями та газообмінні пристрої для видалення CO_2 і насичення води киснем. Результати експериментів доводять, що поєднання процесів фільтрації, ультрафіолетового опромінення та озонування дозволяє підтримувати оптимальний мікробіологічний стан води, необхідний для стабільного росту риби в умовах рециркуляційного водокористування [6, 14].

Серед сучасних способів знезараження води найбільш поширеними є ультрафіолетове опромінення та озонування. Використання УФ-випромінювання сприяє ефективному зниженню кількості мікроорганізмів у водному середовищі. Водночас, як зазначають дослідники [15], застосування озонування у рециркуляційних водних системах є малоприматним, оскільки для досягнення бактерицидного ефекту необхідні значні дози озону, більша частина якого реагує з органічними домішками. Крім того, у процесі озонування утворюються сполуки, що можуть мати токсичну дію [16], у тому числі на рибу та живі корми [5]. Дослідження [6] та [17] підтверджують, що надлишкова концентрація озону викликає пошкодження зябер риби, гіпоксію та загибель особин. Саме тому озонування все частіше розглядають як допоміжний етап, який потребує додаткової фільтрації [18].

В Україні під час вирощування риби у системах замкненого водопостачання найчастіше застосовують озонування для дезінфекції води, а ультрафіолетове опромінення використовують рідше. Ефективність цих методів, а також їх комбінованого застосування [19], визначається складом води, зокрема наявністю у ній розчинених і завислих органічних речовин. На противагу цьому, УФ-опромінювання демонструє високу ефективність щодо широкого спектра мікроорганізмів [20]. Дослідження, проведені у Freshwater Institute (West Virginia, USA), показали, що дози УФ-випромінювання від 75 до 1800 мВт/см² забезпечують інактивацію коліформних бактерій, а мінімальною

ефективною дозою є 77 мВт/см² [21]. Проте ефективність процесу знижується у присутності завислих частинок, які екранують УФ-промені, що підтверджує необхідність попередньої фільтрації [14].

Озонування є одним із ефективних методів знищення небажаних мікроорганізмів, оскільки базується на процесах глибокого окиснення органічних речовин та біологічних структур. Під час обробки води озоном дрібнодисперсні частинки розщеплюються до молекулярного рівня, після чого можуть бути видалені з рециркуляційної системи за допомогою різних типів фільтрів. Такий підхід до очищення води особливо ефективний у рибних інкубаторах, де вирощуються види, чутливі до наявності зважених частинок і бактерій. Водночас, у міжнародній практиці застосування озонування для рибництва зазнало критики через можливі негативні наслідки для біоти [21]. Надлишкова концентрація озону може бути шкідливою для риби в умовах її вирощування, оскільки озон є сильним окислювачем і є токсичним для риби, тому може викликати різні негативні ефекти на аквакультурні системи. Високі рівні озону пошкоджують гілки зябер риби, що призводить до зниження ефективності дихання. Це може призвести до стресу, погіршення росту та здоров'я риби. Крім того, озон впливає на рівновагу водних систем, зокрема знижує розчинення кисню та призводить до гіпоксії (недостатнього кисню) і загибелі риби. Важливо контролювати рівень озону та забезпечувати належне провітрювання і фільтрацію води, щоб уникнути його негативного впливу на рибу і забезпечити здорове середовище для їх вирощування [22].

Більшість проаналізованих наукових робіт [12-23] приділено проблемі використання УФ-випромінювання в рециркуляційних системах вирощування риби.

Варто відзначити, що у багатьох випадках ультрафіолетове знезараження розглядається як безпечніша альтернатива озонуванню. УФ-опромінення з довжиною хвилі в діапазоні 200-280 нм (діапазон УФ-С) забезпечує інактивацію мікроорганізмів завдяки фотохімічним реакціям, які відбуваються в молекулах нуклеїнових кислот усередині клітин. Цей процес відбувається миттєво у межах спеціальної опромінювальної камери [24] і не становить небезпеки ні для риби, ні для обслуговуючого персоналу. За даними дослідження [7], рівень необхідної опроміненості залежить від типу мікроорганізмів: для бактерій і грибів він становить близько 100 мДж/см², тоді як для вірусів потрібні вищі дози – у межах 200-250 мДж/см². Такі значення обумовлені необхідністю компенсувати зниження прозорості води, поглинання УФ-енергії водним середовищем та низьку турбулентність потоку поблизу лампи. Це пояснює потребу у стабілізації електротехнічних параметрів УФ-установок (напруга, струм, інтенсивність випромінювання) та використанні систем автоматизованого контролю [7].

Таким чином, аналіз останніх досліджень свідчить про те, що найбільш перспективним напрямом є

застосування електротехнічних систем УФ-зnezараження, які забезпечують мікробіологічну стабільність води в УЗВ без утворення токсичних побічних з'єднань.

Мета статті

Метою роботи є розробка та експериментальне обґрунтування ефективної електротехнічної системи ультрафіолетового зnezараження води в установках замкненого водопостачання (УЗВ), що використовуються для вирощування риби.

Для досягнення цієї мети передбачено вирішення таких завдань:

- провести аналітичний огляд сучасних методів дезінфекції води в аквакультури та визначити їхні переваги й обмеження;
- дослідити вплив попереднього механічного та біологічного очищення на ефективність ультрафіолетового зnezараження;
- обґрунтувати вибір типу та режимів роботи УФ-ламп як основного елемента електротехнічної системи дезінфекції;
- розробити електротехнічну схему системи зnezараження води, яка включає модулі фільтрації, УФ-камеру, засоби коригування рН, насичення киснем та блок автоматизованого управління;
- визначити оптимальні параметри бактерицидного потоку для інактивації основних патогенних мікроорганізмів у воді при різних об'ємах рециркуляційних систем;
- провести експериментальні дослідження ефективності розробленої системи під час вирощування осетрових у промислових умовах;
- здійснити порівняльний аналіз з традиційними методами зnezараження (озонуванням) з точки зору мікробіологічної ефективності, енергоекономічності та екологічної безпеки.

Очікуваним результатом дослідження є створення науково обґрунтованої технології зnezараження води в УЗВ, що забезпечує стабільну бактеріологічну якість без застосування озонування, мінімізує енергетичні витрати та гарантує безпечні умови для вирощування риби в промислових масштабах.

Виклад основного матеріалу

При проектуванні та розробці системи бактерицидного зnezараження води в установках замкненого водопостачання, що використовуються у рибництві, застосовано метод ультрафіолетового опромінювання з використанням потужних штучних джерел світла, які працюють у спектральному діапазоні 200-280 нм.

У практиці аквакультури розрізняють два основних типи УФ-установок:

перший тип – обладнання, що знижує загальну кількість мікроорганізмів у воді, але без чіткого контролю інтенсивності опромінення (переважно

спрямоване на покращення санітарного стану води і зменшення ризику поширення хвороботворних бактерій);

другий тип – системи, які забезпечують гарантовану інактивацію бактерій та вірусів щонайменше на 4 порядки (10^4), при опроміненості близько 40 мДж/см^2 , що є обов'язковим компонентом сучасних УЗВ.

Серед подібних установок розрізняють УФ-стерилізатори поверхневого та зануреного типів. Поверхневі системи складаються з блоків ламп із відбивачами, встановлених над поверхнею води. Проте їхня ефективність є обмеженою через невелику глибину проникнення випромінювання у товщу води. Натомість стерилізатори з камерами проточного опромінення є значно результативнішими й надійнішими [13], оскільки зnezараження відбувається безпосередньо у водяному потоці. Таке обладнання можна інтегрувати на будь-якому етапі схеми очищення [25], за умови попереднього видалення завислих частинок, які знижують проникність УФ-променів.

Для досягнення необхідних санітарних показників у рециркуляційних системах обробка води повинна здійснюватися безперервно. Вона включає фільтрацію, бактерицидне зnezараження та регулювання фізико-хімічних параметрів середовища (рівень рН, концентрація розчиненого кисню, температура) [26].

У дослідженні представлено конструкцію системи УФ-зnezараження, що реалізує багатоступеневий процес очищення та зnezараження води. Система передбачає послідовне видалення великих механічних домішок, тонке очищення від дрібнодисперсних частинок, які зумовлюють мутність і забарвлення води, а також ультрафіолетову дезінфекцію. Додатково передбачене обладнання (блоки) для коригування рівня рН, насичення води киснем, підтримання необхідної температури та електронний блок керування, який забезпечує автоматизацію процесів. Фільтраційні модулі ефективно видаляють сторонні механічні домішки, проте не вирішують проблему інактивації мікроорганізмів. Тому було сконструйовано УФ-установку потужністю 850 Вт, що містить 10 ламп низького тиску, розташованих вертикально у кварцових чохлах після блоку тонкої фільтрації. Сумарна бактерицидна інтенсивність опромінення 220 Вт/м^2 .

Характеристики використаних ламп наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики УФ-ламп

Тип лампи	P, Вт	I, А	U, В	Енергетична освітленість, Вт/см ²
ZW80D19Y	85	1,0-1,2	120	250-280

Схема запропонованої установки представлена на рис. 1.

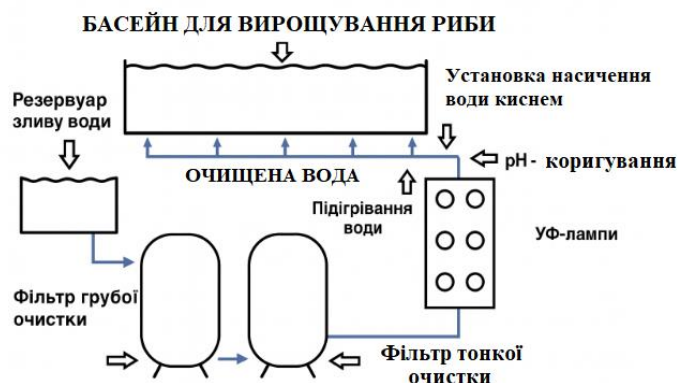


Рис. 1 – Схема очищення та дезінфекції води в УЗВ-системі при вирощуванні риби

Для забезпечення стабільності параметрів процесу ультрафіолетового знезараження в розробленій системі передбачено блок автоматизованого управління, який виконує функції моніторингу, регулювання та захисту. Структура блоку автоматизованого управління включає: мікропроцесорний контролер типу Siemens LOGO; датчики температури, мутності та рівня рН води, фотоелектричний сенсор інтенсивності УФ-випромінювання, сигнальні реле, контактори та модуль живлення ламп, пульт оператора з індикацією основних параметрів.

Контролер обробляє дані від датчиків у реальному часі й регулює роботу системи відповідно до заданих алгоритмів. При зниженні інтенсивності УФ-випромінювання нижче нормативного рівня автоматично подається сигнал на заміну лампи або очищення кварцового чохла. При підвищенні мутності води понад допустиме значення контролер збільшує тривалість фільтрації або інформує оператора про потребу у промиванні фільтрів.

Принцип роботи блоку автоматизованого управління полягає у поетапному контролі основних параметрів (після фільтраційного модуля вода надходить до УФ-камери, де відбувається опромінення):

- датчик УФ-інтенсивності безперервно вимірює рівень опромінення і передає сигнал на контролер;
- контролер порівнює отримані значення з еталонними і при відхиленні здійснює автоматичну корекцію подачі напруги на пускорегулювальні пристрої ламп;
- у разі відхилення температури або зниження напруги мережі активується система аварійного захисту з відключенням живлення ламп та звуковою сигналізацією.

Засоби коригування рН реалізовані у вигляді окремого модуля, інтегрованого в систему контролю води. Вимірювання рівня рН здійснюється за допомогою електрохімічного датчика типу *pH-201*, сигнал з якого надходить до контролера. При зниженні рН нижче 7,0 активується дозатор розчину гідрокарбонату натрію; при підвищенні понад 7,8 – дозатор слабкого розчину оцтової кислоти.

Система дозування працює імпульсно, забезпечуючи підтримання стабільного рівня рН у межах 7,2-7,6, що є оптимальним для осетрових риб у рециркуляційних установках.

Блок автоматизованого управління також здійснює *логуювання* параметрів (інтенсивність випромінювання, температура, рН, час роботи ламп), що дозволяє відстежувати стан системи та планувати технічне обслуговування.

Випробування проводили на аквафермі з вирощування осетрових. УЗВ-система складалася з восьми резервуарів об'ємом по 10 м³ кожен. Очищення води здійснювалося безперервно через канал шириною 200 мм і висотою 950 мм, при рівні води 840-860 мм. Основні умови експерименту наведено в табл. 2.

Моніторинг мікробіологічних показників виконувався у сертифікованій лабораторії. Результати аналізу продемонстрували, що загальне мікробне число не перевищувало нормативних 100 КУО/см³: від 17 КУО/см³ у вихідній воді до 74 КУО/см³ на 28-й день спостережень. Коліформи та *E. coli* у всіх випадках були відсутні [28].

Таблиця 2

Умови проведення експериментальних робіт

Температура, °C (20-22 °C)*	Рівень рН (7,2-7,8)*	Вміст розчиненого кисню, мг/л (5,5-6)*
21-22 °C	7,3-7,7	5,6-5,8

* - нормоване значення

Значення отриманих результатів бактеріологічних досліджень води в басейні при вирощуванні риби зведені в табл. 3.

Дослідження підтвердили, що комбінація фільтрації та УФ-опромінення забезпечує необхідну санітарно-бактеріологічну якість води у басейнах об'ємом до 80 м³. Протягом 6 місяців використання системи не було зафіксовано проявів бактеріальних захворювань (*Flexibacter Cytophaga*, *Aeromonas*) та грибкових уражень (*Saprolegniales*)

Таблиця 3

Результати бактеріологічного дослідження води

Показник	Ви- моги НД	Результати дослідження, кількість днів				
			3	7	14	28
ЗМЧ КУО/см ³ при 37 ⁰ С	≤100 КУО в 1 см ³	17	28	42	37	74
Загальні коліформи КУО/100см ³	-	Не виявлено				
E.coli КУО/100см ³	-	Не виявлено				

Результати та їх обговорення

Проведені дослідження на аквафермі з вирощування осетрових у рециркуляційній системі об'ємом 80 м³ (8 резервуарів по 10 м³) показали, що застосування УФ-установки потужністю 850 Вт (10 ламп низького тиску по 85 Вт) у поєднанні з попередньою механічною та тонкою фільтрацією води забезпечує стабільне знезараження протягом усього періоду спостереження.

Визначено, що сумарний бактерицидний потік становив 220 Вт/м², що відповідає оптимальним значенням для інактивації більшості бактерій та грибків у воді. Згідно з результатами бактеріологічних досліджень, наведені в таблиці 2, загальне мікробне число (ЗМЧ) у воді не перевищувало нормативного значення 100 КУО/см³, а коліформи та E.coli не були виявлені. Початкове значення ЗМЧ складало 17 КУО/см³, після 3 діб воно підвищувалося до 28 КУО/см³, через 7 діб – до 42 КУО/см³, однак залишалося у межах норми. На 28-й день дослідження кількість мікроорганізмів становила 74 КУО/см³, що також відповідало граничним допустимим показникам.

Додатково встановлено, що за період спостереження (6 місяців) у риб не було виявлено характерних бактеріальних хвороб (*Aeromonas*, *Flexibacter* *Cytophaga*) та грибкових інфекцій (*Saprolegniales*). Це підтверджує ефективність застосованої технології.

Отримані дані свідчать, що використання ультрафіолетового випромінювання у поєднанні з попередньою фільтрацією є ефективним і безпечним методом знезараження води в УЗВ-системах. Подібні результати наведені у роботі [3], де вказано, що застосування УФ-систем дозволяє суттєво зменшити чисельність патогенних мікроорганізмів у воді.

Порівняно з озонуванням, яке є поширеним методом знезараження в Україні [1], ультрафіолетове опромінювання має низку переваг:

- не утворює токсичних побічних продуктів, небезпечних для риби [5];
- забезпечує миттєву інактивацію мікроорганізмів без впливу на фізико-хімічні параметри води [7];

- не призводить до гіпоксії та пошкодження зябер риби, що характерно для надмірних концентрацій озону [6, 18].

Ефективність роботи УФ-установки підтверджується тим, що навіть за тривалого використання у рециркуляційній системі (до 80 м³) рівень бактеріологічних показників залишався у межах норми. Аналогічні висновки наведені у роботі [9], де зазначається, що доза УФ-опромінювання 75-100 мВт/см² достатня для інактивації більшості бактерій у воді.

Розроблена електротехнічна система ультрафіолетового знезараження може ефективно використовуватися в промислових рибницьких господарствах, оскільки забезпечує: стабільність мікробіологічних показників води; зменшення ризиків виникнення бактеріальних і грибкових захворювань; екологічну безпеку та відсутність негативного впливу на рибу і персонал; енергоефективність завдяки використанню ламп низького тиску.

Висновки

1. У роботі запропоновано та випробувано електротехнічну технологію знезараження води в басейнах рециркуляційних аквакультурних систем, яка ґрунтується на застосуванні ультрафіолетового опромінювання без використання озонування. Такий підхід дозволяє уникнути утворення токсичних побічних продуктів і забезпечує екологічну безпеку для риби.

2. Встановлено, що для УЗВ об'ємом до 80 м³ достатньо застосування УФ-установки потужністю 850 Вт, яка створює бактерицидний потік інтенсивністю 220 Вт/м², що відповідає рекомендованим дозам для інактивації бактерій та грибків. За умов експлуатації протягом шести місяців якість води відповідала санітарно-гігієнічним нормам, а випадків бактеріальних чи грибкових захворювань риби не зафіксовано.

3. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої УФ-системи як ефективного та енергоощадного інструмента підтримання мікробіологічної стабільності у промислових аквакультурних господарствах. Результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації промислових УЗВ-систем.

Перелік використаних джерел

- [1] New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability / C. I. M. Martins et al. *Aquacultural Engineering*. 2010. Vol. 43, No. 3. Pp. 83-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>.
- [2] Timmons M. B., Ebeling J. M. *Recirculating Aquaculture*. 2nd ed. Ithaca, NY: Cayuga Aqua Ventures, 2013. 948 p.
- [3] Summerfelt S. T. *Ozonation and UV irradiation – an introduction and examples of current applications*. *Aquacultural Engineering*. 2003. Vol. 28, no. 1-2.

- Pp. 21-36. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00069-9).
- [4] Escherichia coli survival in waters: Temperature dependence / R. A. Blaustein et al. *Water Research*. 2013. Vol. 47, iss. 2. Pp. 569-578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.027>.
- [5] Cabello F. C. Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment. *Environmental Microbiology*. 2006. Vol. 8, no. 7. Pp. 1137-1144. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x>.
- [6] August G. A., Graham G. A. Ozone applications in recirculating aquaculture systems. *Ozone: Science and Engineering*. 2011. Vol. 33, no. 5. Pp. 345-367. DOI: <https://doi.org/10.1080/01919512.2011.604595>.
- [7] The scientific foundations of ultraviolet radiation usage: effects, sources, and applications in water disinfection. Monograph / Yeleussinov B., Sakhno T., Semenov A., Popov S. Kyzylorda, 2024. 204 p.
- [8] Chen S., Ling J., Blancheton J.-P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*. 2006. Vol. 34(3). Pp. 179-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.004>.
- [9] Mamane-Gravetz H., Linden K. G. Impact of particle aggregated microbes on UV disinfection. *Aquatic Microbial Ecology*. 2004. Vol. 36. Pp. 131-138. DOI: <https://doi.org/10.3354/ame036131>.
- [10] Hijnen W. A. M., Beerendonk E. F., Medema G. J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water: A review. *Water Research*. 2006. Vol. 40, no. 1. Pp. 3-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.10.030>.
- [11] Assessment of the danger of using ultraviolet lamps in electrical systems / A. Semenov et al. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. R. 100, no. 2. Pp. 152-155. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2024.02.31>.
- [12] Semenov A., Sakhno T., Barashkov N. Method of ultraviolet disinfection of water when growing fish in recirculating systems. *ACS Fall 2023 Harnessing the Power of Data*, San Francisco, CA & Hybrid, 13-17 August 2023. Abstract No. 3902516.
- [13] Combined method of UV treatment and ozonation during water disinfection in swimming / A. Semenov et al. *Proceedings of the 15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, Ukraine, 17-19 November 2021. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2095>.
- [14] Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication / J. P. Blancheton et al. *Aquacultural Engineering*. 2013. Vol. 53. Pp. 30-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.009>.
- [15] The effects of moderate ozonation or high intensity UV-irradiation on the microbial environment in RAS for marine larvae / K. J. K. Attramadal et al. *Aquaculture*. 2012. Vol. 330-333. Pp. 121-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.042>.
- [16] Semenov A. A., Sakhno T. V. Disinfection of swimming pool water by UV irradiation and ozonation. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2021. Vol. 43, no. 6. Pp. 491-496. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063455X21060084>.
- [17] Gräslund S., Bengtsson B.-E. Chemicals and biological products used in Southeast Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment – a review. *Science of the Total Environment*. 2001. Vol. 280, no. 1-3. Pp. 93-131. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00818-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00818-X).
- [18] Closed circulatory system for mariculture using ozone / Kobayashi T., Yotsumoto H., Ozawa T., Kawahara H. *Ozone Science and Engineering*. 1993. Vol. 15. Pp. 311-330. DOI: <https://doi.org/10.1080/01919519308552492>.
- [19] Семенов А. О., Кожушко Г. М., Сахно Т. В. Знезараження води комбінованими методами – УФ-випромінювання в поєднанні з іншими технологіями. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 3/3 (29). С. 67-71.
- [20] Bolton J. R., Cotton C. A. The Ultraviolet Disinfection Handbook. Denver, CO: American Water Works Association (AWWA), 2008. 149 p.
- [21] Inactivation of bacteria using ultraviolet irradiation in a recirculating salmonid culture system / M. J. Sharrer et al. *Aquacultural Engineering*. 2005. Vol. 33. Pp. 135-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.12.001>.
- [22] Wedemeyer G. Physiology of Fish in Intensive Culture Systems. 1 ed. Springer, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6011-1>.
- [23] Runia W.T. A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless culture. *Acta Horticulturae*. 1995. Vol. 382. Pp. 221-229. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.382.25>.
- [24] Semenov A. Device for disinfection of water by using ultraviolet radiation. *Physics of Liquid Matter: Modern Problems (PLMMP 2018)*: Proceedings of the 8th International Conference, Kyiv, 18-22 May 2018. Pp. 1-20.
- [25] Ultraviolet radiation as disinfection for fish surgical tools / R. W. Walker et al. *Animal Biotelemetry*. 2013. Vol. 1, no. 1. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1186/2050-3385-1-4>.
- [26] Bregnballe J. A Guide to Recirculation Aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. FAO and EUROFISH, 2015. 95 p.

DEVELOPMENT OF AN ELECTROTECHNICAL SYSTEM FOR UV WATER
DISINFECTION IN RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEMS

- Semenov A.O.** PhD (Physics and Mathematics), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>, e-mail: asemen2015@gmail.com;
- Semenova N.V.** head of marketing department, Poltava Foundry and Mechanical Plant, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4495-7712>, e-mail: nvsemenova78@gmail.com

One of the key tasks in the operation of recirculating aquaculture systems (RAS) for fish farming is to ensure the microbiological safety of water. Among the known disinfection methods, the most widely used are ozonation, ultraviolet (UV) irradiation, and their combinations. However, the application of ozone is accompanied by several limitations: toxicity to aquatic organisms, formation of harmful by-products, and reduction of dissolved oxygen in water, which makes it less suitable for RAS. This study presents the results of research on the development and implementation of an electrotechnical UV water disinfection system operating on the principle of flow-through irradiation with preliminary filtration. As a source of bactericidal radiation, low-pressure lamps with a maximum emission wavelength of 254 nm were used. Experimental studies conducted at a sturgeon aquafarm demonstrated that the use of a UV unit with a total power of 850 W (10 low-pressure lamps) provides a stable bactericidal flux of 220 W/m² and ensures effective inactivation of microorganisms in systems with a water volume of 100 m³. Throughout the observation period, the total microbial count, total coliforms, and E. coli did not exceed permissible limits, and no cases of bacterial or fungal diseases in fish were recorded. The developed electrotechnical water disinfection system improves the reliability and biological safety of RAS operation without the use of ozone, is energy-efficient, and can be scaled for industrial aquaculture facilities.

Keywords: aquaculture, recirculating aquaculture systems (RAS), ultraviolet irradiation, water disinfection, microorganism inactivation, electrotechnical systems.

References

- [1] C.I.M. Martins et al., "New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability," *Aquacultural Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 83–93, 2010. doi: [10.1016/j.aquaeng.2010.09.002](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002).
- [2] M.B. Timmons, and J.M. Ebeling, *Recirculating Aquaculture*, 2nd ed. Ithaca, NY: Cayuga Aqua Ventures, 2013.
- [3] S.T. Summerfelt, "Ozonation and UV irradiation—an introduction and examples of current applications," *Aquacultural Engineering*, vol. 28, no. 1-2, pp. 21-36, 2003. doi: [10.1016/S0144-8609\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00069-9).
- [4] R.A. Blaustein, Y. Pachepsky, R.L. Hill, D.R. Shelton, and G. Whelan, "Escherichia coli survival in waters: Temperature dependence," *Water Research*, vol. 47, iss. 2, pp. 569–578, 2013. doi: [10.1016/j.watres.2012.10.027](https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.027).
- [5] F.C. Cabello, "Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment," *Environmental Microbiology*, vol. 8, no. 7, pp. 1137-1144, 2006. doi: [10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x).
- [6] G.A. August, and G.A. Graham, "Ozone applications in recirculating aquaculture systems," *Ozone: Science and Engineering*, vol. 33, no. 5, pp. 345-367, 2011. doi: [10.1080/01919512.2011.604595](https://doi.org/10.1080/01919512.2011.604595).
- [7] B. Yeleussinov, T. Sakhno, A. Semenov, and S. Popov, *The Scientific Foundations of Ultraviolet Radiation Usage: Effects, Sources, and Applications in Water Disinfection*. Monograph. Kyzylorda, 2024.
- [8] S. Chen, J. Ling, and J.-P. Blancheton, "Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors," *Aquacultural Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 179-197, 2006. doi: [10.1016/j.aquaeng.2005.09.004](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.004).
- [9] H. Mamane-Gravetz, and K.G. Linden, "Impact of particle aggregated microbes on UV disinfection," *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 36, pp. 131-138, 2004. doi: [10.3354/ame036131](https://doi.org/10.3354/ame036131).
- [10] W.A.M. Hijnen, E.F. Beerendonk, and G.J. Medema, "Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water: A review," *Water Research*, vol. 40, no. 1, pp. 3-22, 2006. doi: [10.1016/j.watres.2005.10.030](https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.10.030).
- [11] A. Semenov, S. Popov, S. Yakhin, B. Yeleussinov, and T. Sakhno, "Assessment of the danger of using ultraviolet lamps in electrical systems," *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 100, no. 2, pp. 152-155, 2024. doi: [10.15199/48.2024.02.31](https://doi.org/10.15199/48.2024.02.31).
- [12] A. Semenov, T. Sakhno, and N. Barashkov, "Method of ultraviolet disinfection of water when growing fish in recirculating systems," in *Proc. of the ACS Fall 2023 Harnessing the Power of Data*, San Francisco, CA & Hybrid, Aug. 13-17, 2023, abstract No. 3902516.
- [13] A. Semenov, S. Vyzhva, T. Sakhno, N. Semenova, and O. Nikityuk, "Combined method of UV treatment and ozonation during water disinfection in swimming," in *Proc. 15th Int. Conf. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, Ukraine, Nov. 17-19, 2021, pp. 1-5. doi: [10.3997/2214-4609.20215K2095](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2095).

- [14] J.P. Blancheton, K.J.K. Attramadal, L. Michaud, E. Roque d'Orbcastel, and O. Vadstein, "Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication," *Aquacultural Engineering*, vol. 53, pp. 30-39, 2013. doi: **10.1016/j.aquaeng.2012.11.009**.
- [15] K.J.K. Attramadal, G. Øie, T.R. Størseth, M.O. Alver, O. Vadstein, and Y. Olsen, "The effects of moderate ozonation or high intensity UV-irradiation on the microbial environment in RAS for marine larvae," *Aquaculture*, vols. 330–333, pp. 121-129, 2012. doi: **10.1016/j.aquaculture.2011.11.042**.
- [16] A.A. Semenov, and T.V. Sakhno, "Disinfection of swimming pool water by UV irradiation and ozonation," *Journal of Water Chemistry and Technology*, vol. 43, no. 6, pp. 491-496, 2021. doi: **10.3103/S1063455X21060084**.
- [17] S. Gräslund, and B.-E. Bengtsson, "Chemicals and biological products used in Southeast Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment – a review," *Science of the Total Environment*, vol. 280, no. 1-3, pp. 93-131, 2001. doi: **10.1016/S0048-9697(01)00818-X**.
- [18] T. Kobayashi, H. Yotsumoto, T. Ozawa, and H. Kawahara, "Closed circulatory system for mariculture using ozone," *Ozone: Science & Engineering*, vol. 15, pp. 311-330, 1993. doi: **10.1080/01919519308552492**.
- [19] A.O. Semenov, H.M. Kozhushko, and T.V. Sakhno, "Znezarazhennia vody kombinovanyimi metodami – UF-vyprominiuvannia v poiednanni z inshymi tekhnolohiiamy" ["Water disinfection by combined methods – UV irradiation with other technologies"], *Tekhnolohicheskyy audit i rezervy proizvodstva – Technology audit and production reserves*, no. 3/3(29), pp. 67-71, 2016. (Ukr.)
- [20] J. R. Bolton, and C.A. Cotton, *The Ultraviolet Disinfection Handbook*. Denver, CO: American Water Works Association (AWWA) Publ., 2008.
- [21] M.J. Sharrer, S.T. Summerfelt, G.L. Bullock, L.E. Gleason, and J. Taeuber, "Inactivation of bacteria using ultraviolet irradiation in a recirculating salmonid culture system," *Aquacultural Engineering*, vol. 33, pp. 135-149, 2005. doi: **10.1016/j.aquaeng.2004.12.001**.
- [22] G. Wedemeyer, *Physiology of Fish in Intensive Culture Systems*, 1-st ed. Springer, 1996. doi: **10.1007/978-1-4615-6011-1**.
- [23] W.T. Runia, "A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless culture," *Acta Horticulturae*, vol. 382, pp. 221-229, 1995. doi: **10.17660/ActaHortic.1995.382.25**.
- [24] A. Semenov, "Device for disinfection of water by using ultraviolet radiation," in *Proc. of the 8th Int. Conf. Physics of Liquid Matter: Modern Problems (PLMMP 2018)*, Kyiv, May 18-22, 2018, pp. 1-20.
- [25] R.W. Walker et al., "Ultraviolet radiation as disinfection for fish surgical tools," *Animal Biotelemetry*, vol. 1, no. 1, pp. 1-4, 2013. doi: **10.1186/2050-3385-1-4**.
- [26] J. Bregnballe, *A Guide to Recirculation Aquaculture: An Introduction to the New Environmentally Friendly and Highly Productive Closed Fish Farming Systems*. FAO and EUROFISH, 2015.

Стаття надійшла 27.09.2025

Стаття прийнята 07.10.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Семенов А. О., Семенова Н. В. Розробка електротехнічної системи УФ-дезінфекції води для рециркуляційних аквакультурних установок. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 132-139. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351015>.

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 669.162.22

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351016

КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ПІД ЧАС ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ НА ДУТТІ ДВОХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ

Кравченко В.П.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8467-7796 , e-mail: kravchenko_vp@ukr.net ;
Койфман О.О.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2075-7417 , e-mail: aleksey.koyfman@mipolytech.education ;
Сімкін О.І.	канд. техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9939-7866 , e-mail: a.i.simkin@mipolytech.education ;
Мірошніченко В.І.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5956-7867 , e-mail: v.i.miroshnichenko@mipolytech.education

У статті розглядається проблема забезпечення безперервного й стабільного подавання гарячого дуття у доменну піч під час циклічної роботи регенеративних повітрянагрівачів (ПН). Традиційно чотири ПН у блоці працюють послідовно, по черзі переходячи з режиму нагріву в режим дуття, що призводить до значних коливань температури і великих гідравлічних втрат. Автори досліджують альтернативний спосіб організації роботи — паралельний режим двох ПН, при якому два нагрівачі одночасно подають дуття, а інші два перебувають у режимі регенерації тепла. Проведено аналіз існуючих режимів: послідовного, попарно-паралельного та змішаного, з урахуванням технологічних обмежень і особливостей теплового агрегату. Виконано математичне моделювання процесу, яке продемонструвало, що в паралельному режимі час дуття одного ПН збільшується з 60 до 160 хвилин, тоді як час нагріву становить 120 хвилин, що створює необхідний резерв для маневрування з потоками повітря. При цьому втрати тиску знижуються в 8 разів, а число переключень між режимами за добу зменшується з 24 до 18. Окрему увагу приділено алгоритму автоматичного переходу до паралельного режиму залежно від поточного стану температури й тиску в кожному ПН. Розроблено блок-схему керування, яка забезпечує своєчасне відкриття та закриття клапанів холодного дуття, що дозволяє утримувати відхилення температури гарячого дуття в заданих межах без застосування складних ручних регулювань. Запропоноване рішення дозволяє значно підвищити ефективність використання тепла регенератора, зменшити гідравлічні втрати та стабілізувати температурний режим без додаткових капіталовкладень у модернізацію обладнання.

Ключові слова: доменна піч, повітрянагрівачі, паралельний режим дуття, умови переключення повітрянагрівачів, зменшення втрат тиску дуття, кількість переключень повітрянагрівачів, алгоритм переключення, система керування.

Постановка проблеми

Технологічний процес доменної плавки вимагає безперервного забезпечення доменної печі (ДП) потоком гарячого дуття із стабільними параметрами температури та витрати. Однак формування такого потоку характеризується циклічністю, що обумовлено специфікою функціонування повітрянагрівачів (ПН) як теплових агрегатів регенеративного типу [1, 2].

Традиційно для доменної печі використовують чотири повітрянагрівачі, об'єднані в єдиний технологічний блок. Найпоширенішим режимом експлуатації є послідовна робота ПН, при якій один агрегат функціонує в режимі подачі дуття, тоді як решта перебувають у стадії нагріву. Оскільки температура дуття на виході

робочого ПН зазвичай перевищує задані параметри, система автоматичного регулювання температури забезпечує додавання холодного дуття через відповідний трубопровід.

Стабілізація температурного режиму дуття в стаціонарному режимі роботи ПН не становить технологічних труднощів. Проте забезпечення температурної стабільності під час переключення режимів ПН представляє значно більшу складність. Перехідні періоди характеризуються найсуттєвішими збуреннями системи, зокрема значним перевищенням температури дуття відносно номінальних значень, що негативно впливає на тепловий баланс доменної печі.

Прагнення до збільшення тривалості безперервного дуття та мінімізації частоти переключень ПН

стимулює дослідження альтернативних режимів експлуатації блоку повітрянагрівачів. Серед перспективних підходів слід виділити попарно-паралельну та паралельну роботу ПН [1, 3]. На сучасному етапі окремі металургійні підприємства України впроваджують паралельний режим роботи двох повітрянагрівачів.

Мета даного дослідження полягає в аналізі особливостей функціонування системи формування та подачі гарячого дуття до доменної печі при паралельній роботі двох повітрянагрівачів у режимі дуття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Функціонування повітрянагрівачів та систем автоматичного регулювання температури в процесі дуття є предметом широкого висвітлення у науково-технічній літературі [1-5]. Постійний пошук ефективних технологічних схем та технічних засобів автоматичного регулювання температури гарячого дуття доменних печей зумовлений потребою вдосконалення систем забезпечення ДП гарячим дуттям [1, 4-6]. Водночас, дослідження роботи системи підготовки дуття в перехідні періоди (переключення ПН) представлені у значно меншому обсязі та характеризуються суперечливістю в інтерпретації результатів.

Для забезпечення безперервної подачі гарячого дуття до доменної печі блок повітрянагрівачів може функціонувати в одному з п'яти основних режимів [1, 3, 4, 7]:

1. Послідовний режим по часу передбачає роботу трьох ПН, де один агрегат протягом визначеного періоду (наприклад, однієї години) перебуває в режимі дуття, тоді як інші функціонують у режимі нагріву (мінімальний період нагрівання становить 1,5 години). При досягненні заданої тривалості дуття ініціюється процес переключення: охолоджений ПН переводиться в режим нагрівання, а найбільш нагрітий – у режим дуття.

2. Послідовний сигнальний режим базується на сигналі системи автоматичного регулювання температури дуття про закриття регулюючого органу на трубопроводі подачі холодного дуття для змішування. За цим сигналом до трубопроводу гарячого дуття підключається нагрітий ПН, тоді як охолоджений відключається та переводиться в режим нагрівання.

3. Паралельний режим характеризується одночасним функціонуванням двох ПН у режимі дуття – одного з вищою температурою (менша тривалість дуття) та іншого з нижчою температурою (більша тривалість дуття), тоді як два інших агрегати перебувають у режимі нагрівання. Потік холодного дуття розподіляється рівномірно між двома працюючими ПН. Стабілізація температури дуття досягається шляхом автоматичного регулювання кількості холодного дуття для змішування у трубопроводі гарячого дуття.

4. Попарно-паралельний режим передбачає роботу двох ПН у режимі дуття зі стабілізацією температури через регулювання співвідношення кількості

холодного дуття, що проходить через кожен агрегат. Основний обсяг холодного дуття спрямовується через менш нагрітий ПН, решта – через більш нагрітий. З плином часу, внаслідок охолодження ПН, кількість дуття через більш нагрітий агрегат збільшується, а через менш нагрітий – зменшується. Коли весь обсяг дуття починає проходити через більш нагрітий ПН, менш нагрітий відключається та переводиться в режим нагрівання, а нагрітий на цей момент ПН переводиться в режим дуття і цикл повторюється. Основним недоліком цього методу є необхідність значної технічної реконструкції тракту підведення холодного дуття до ПН, включаючи встановлення вузлів контролю та регулювання витрат та систем регулювання співвідношення цих витрат на трубопроводі кожного ПН, що потребує значних капітальних інвестицій.

5. Змішаний режим характеризується тим, що частину періоду дуття працює один ПН, стабілізація температури здійснюється додаванням холодного повітря у трубопровід гарячого дуття. При зменшенні кількості доданого холодного дуття до нуля підключається попередньо нагрітий ПН, і наступну частину періоду вони працюють паралельно. Стабілізація температури дуття забезпечується розподіленням дуття між гарячим та охолодженим ПН. Цей режим також потребує наявності вузлів контролю та регулювання кількості холодного дуття на вході всіх ПН, що передбачає реконструкцію тракту подачі холодного дуття на всіх ПН.

У сучасній практиці найбільшого поширення набув послідовний режим завдяки своїй простоті. Однак останнім часом окремі металургійні підприємства почали впроваджувати паралельний режим роботи двох ПН. Слід зазначити, що особливості функціонування повітрянагрівачів у цьому режимі практично не висвітлені у науково-технічній літературі.

Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю аналізу особливостей паралельного режиму роботи повітрянагрівачів та заповнення існуючої прогалини в науковому висвітленні цієї проблематики.

Мета статті

Метою даного дослідження є комплексний аналіз режиму паралельного функціонування двох повітрянагрівачів доменної печі в процесі формування гарячого дуття.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

- розробити математичну модель паралельного режиму роботи повітрянагрівачів для дослідження його характерних особливостей;
- провести порівняльний аналіз ефективності паралельного режиму відносно традиційних схем експлуатації блоку повітрянагрівачів;

- оцінити вплив паралельного режиму на стабільність та безперервність процесу подачі гарячого дуття;
- дослідити можливості мінімізації гідравлічних втрат при паралельній роботі ПН;
- визначити параметри оптимального автоматичного регулювання температури дуття в умовах паралельного функціонування повітрянагрівачів.

Реалізація поставлених завдань дозволить обґрунтувати доцільність впровадження паралельного режиму роботи повітрянагрівачів та розробити рекомендації щодо оптимізації теплового режиму доменної печі.

Виклад основного матеріалу

Безперервне забезпечення доменної печі гарячим дуттям вимагає функціонування блоку повітрянагрівачів у визначеному режимі з автоматичною стабілізацією температурних параметрів дуття. Як при послідовному, так і при паралельному режимах експлуатації ПН стабілізація температури дуття здійснюється системою автоматичного регулювання (САР) температури гарячого дуття традиційної структури (рис. 1). В якості зворотного зв'язку контролюється температура дуття за допомогою датчика, розташованого на трубопроводі гарячого дуття перед кільцевим трубопроводом доменної печі. Сигнал поточної температури гарячого дуття з цього датчика порівнюється із заданим значенням, що встановлюється вручну задатчиком (ЗД). Отримана різниця між фактичним та номінальним значеннями температури надходить на вхід автоматичного регулятора (АР). Автоматичний регулятор генерує керуючий

вплив, який через виконавчий механізм (ВМ) регулює положення змішувальної заслони (ЗЗ) на байпасному трубопроводі. Таким чином забезпечується збільшення або зменшення подачі холодного дуття для змішування, що дозволяє підтримувати температуру гарячого дуття на заданому рівні.

Представлена система автоматичного регулювання характеризується класичною структурою управління з одноконтурним регулюванням за відхиленням, що забезпечує стабільність теплового режиму доменної печі незалежно від режиму роботи блоку повітрянагрівачів.

Описаний алгоритм регулювання функціонує до моменту надходження сигналу на переключення повітрянагрівачів. При автоматичному процесі переключення ПН формування такого сигналу відбувається автоматично відповідно до заданого режиму роботи блоку повітрянагрівачів. Найбільшого поширення набув послідовний режим експлуатації ПН з ініціацією переключення при закритті ЗЗ. Коли температура повітря на виході ПН, що працює в режимі дуття, знижується до значення заданої температури дуття, автоматичний регулятор повністю закриває ЗЗ на байпасному трубопроводі холодного дуття. Цей стан є індикаторним сигналом для початку процесу переключення повітрянагрівачів. Процес переключення ПН супроводжується порушенням стабільності температурного режиму гарячого дуття, що надходить до доменної печі. Такі температурні коливання становлять значні збурення для процесу доменної плавки та можуть негативно впливати на технологічні показники виробництва.

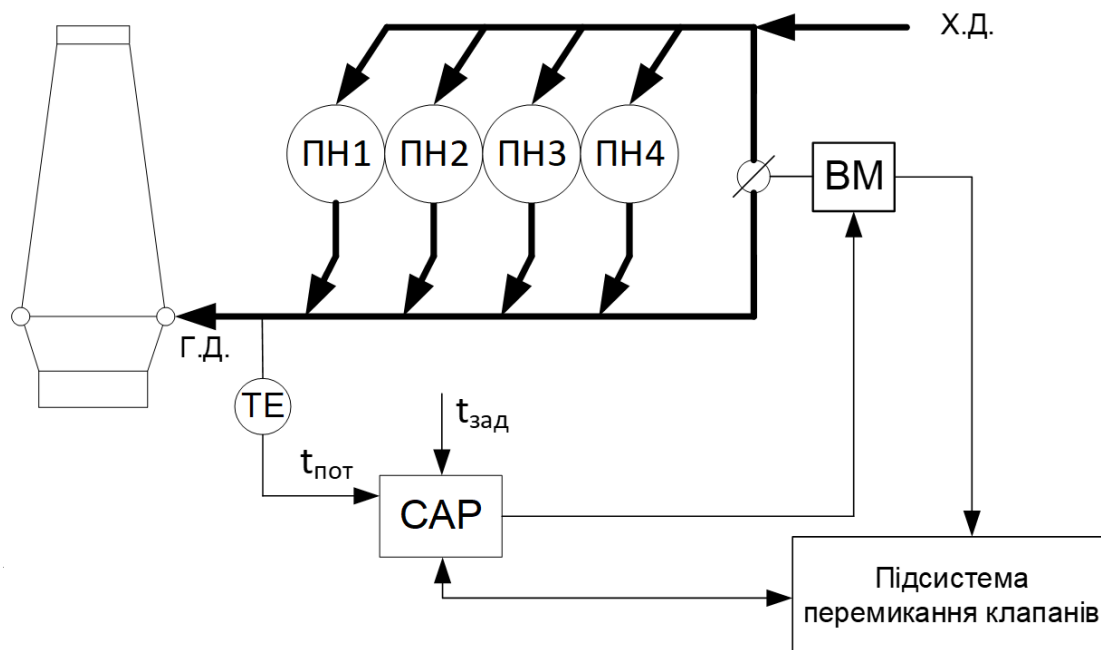


Рис. 1 – Структура системи автоматичного регулювання температури гарячого дуття

Для послідовного режиму роботи блоку ПН задана температура дуття відповідно до теплового балансу процесу змішування гарячого і холодного дуття визначається співвідношенням:

$$t_{\text{ДЗад}} = \frac{k \cdot (G_{\text{мр}\Sigma} - G_{33}(\tau)) \cdot t_1(\tau) \cdot C_{p t_1}^m + G_{33}(\tau) \cdot t_2 \cdot C_{p t_2}^m}{k \cdot (G_{\text{мр}\Sigma} - G_{33}(\tau)) \cdot C_{p t_3}^m + G_{33}(\tau) \cdot C_{p t_3}^m},$$

де $t_{\text{ДЗад}}$ – температура дуття на вході у піч (задана) [°C];

$G_{\text{мр}\Sigma}$ – загальна масова кількість холодного дуття на піч [кг/с];

$k = 0,9$ – доля виходу гарячого дуття на виході ПН від загальної кількості Q_{Σ} холодного дуття на піч (змінюється в часі системою автоматичного регулювання температури дуття, в залежності від положення 33);

$G_{33}(\tau)$ – кількість холодного дуття на змішування (змінюється в часі системою автоматичного регулювання температури дуття) [кг/с];

$t_1(\tau)$ – температура дуття на виході працюючого на дутті ПН (температура склепіння) [°C];

t_2 – температура холодного дуття на змішування [°C];

$C_{p t_1}^m$ – теплоємність дуття при температурі t_1 [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$];

$C_{p t_2}^m$ – теплоємність дуття при температурі t_2 [$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{K}}$];

$C_{p t_3}^m$ – теплоємність дуття на вході в піч при температурі t_3 [$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{K}}$].

При паралельній роботі потік холодного повітря розділяється та у рівних частинах проходить через обидва ПН. Тоді задана температура дуття $t_{\text{ДЗад}}$ буде визначатися рівнянням:

$$t_{\text{ДЗад}} = \frac{k \cdot \left[\frac{G_{\text{мр}\Sigma} - G_{33}(\tau)}{2} t_{11} \cdot C_{p t_{11}}^m + \frac{G_{\text{мр}\Sigma} - G_{33}(\tau)}{2} t_{12} \cdot C_{p t_{12}}^m \right] + G_{33}(\tau) \cdot t_2 \cdot C_{p t_2}^m}{C_{p t_{\text{ДЗад}}}^m \cdot \left[k \cdot (G_{\text{мр}\Sigma} + (1 - k) \cdot G_{33}(\tau)) \right]},$$

де $t(\tau)_{11}$ – температура дуття на виході працюючого гарячого ПН (температура склепіння) [°C];

$t(\tau)_{12}$ – температура дуття на виході працюючого охолодженого ПН (температура склепіння) [°C];

t_2 – температура холодного дуття на змішування [°C];

$C_{p t_{11}}^m$ – теплоємність дуття при температурі t_{11} [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$];

$C_{p t_{12}}^m$ – теплоємність дуття при температурі t_{12} [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$];

$C_{p t_2}^m$ – теплоємність холодного дуття на змішування при температурі t_2 [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$];

$C_{p t_{\text{ДЗад}}}^m$ – теплоємність дуття на вході в піч при температурі $t_{\text{ДЗад}}$ [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$].

Значення масової теплоємності гарячого повітря для діапазону температур 900-1250°C [8] наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Масова теплоємність гарячого повітря

$t[^\circ\text{C}]$	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
$C_{p t}^m$ [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$]	1,173	1,179	1,185	1,193	1,199	1,204	1,210	1,216

Паралельне функціонування двох повітрянагрівачів має бути припинене по закритті змішувальної заслони, коли температура змішаного дуття з обох ПН досягає заданого значення температури дуття.

Ця умова свідчить про те, що змішаний потік дуття з обох повітрянагрівачів досяг номінального температурного рівня та більше не може його підтримувати. У такому випадку виникає необхідність відключення охолодженого ПН та підключення попередньо нагрітого агрегату для забезпечення безперервності технологічного процесу. В момент переключення температуру дуття можна описати наступним рівнянням:

$$t_{\text{ДЗад}} = \frac{k \cdot [0,5 \cdot G_{\text{мр}\Sigma} \cdot t_{11} \cdot C_{p t_{11}}^m + 0,5 \cdot G_{\text{мр}\Sigma} \cdot t_{12} \cdot C_{p t_{12}}^m]}{C_{p t_{\text{ДЗад}}}^m \cdot k \cdot G_{\text{мр}\Sigma}}.$$

Після спрощення маємо рівняння:

$$t_{\text{ДЗад}} = \frac{0,5 \cdot [t_{11} C_{p t_{11}}^m + t_{12} C_{p t_{12}}^m]}{C_{p t_{\text{ДЗад}}}^m}$$

або

$$t_{\text{ДЗад}} \cdot C_{p t_{\text{ДЗад}}}^m = 0,5 \cdot [t_{11} C_{p t_{11}}^m + t_{12} C_{p t_{12}}^m]. \quad (1)$$

Відповідно до рівняння (1), умовою забезпечення заданої температури дуття обома повітрянагрівачами в момент відсутності холодного дуття для змішування (при повному закритті 33 системою автоматичного регулювання) є рівність між значенням ентальпії гарячого дуття та половиною значення ентальпії сумарного потоку дуття з ПН. У цьому рівнянні відомою є лише ліва частина, що включає задану температуру дуття та його теплоємність, тоді як права частина містить чотири невідомі параметри. Така кількість невідомих

унеможливилося безпосереднє визначення температури холодного ПН у момент початку його відключення. Однак, враховуючи те, що значення теплоємності повітря в діапазоні 1000-1250°C відрізняються лише у другому знаку після коми (табл. 1), рівняння (1) може бути спрощене до наступного вигляду:

$$2 \cdot t_{\text{дзад}} \sim [t_{11} + t_{12}]. \quad (2)$$

Таким чином, у момент припинення подачі холодного повітря для змішування (закриття 33) сума температур дуття на виході більш нагрітого та більш охолодженого ПН має приблизно дорівнювати подвоєному значенню заданої температури дуття. Комбінації цілочисельних t_{11} та t_{12} в діапазоні 1000-1250°C, що задовольняють рівнянню (2), можуть мати варіативний характер. Визначення конкретних температурних значень та опис роботи ПН у паралельному режимі значно спрощується за умови однакової швидкості зниження температури дуття обох повітрянагрівачів.

Для розглянутого типу ПН при експлуатації в послідовному режимі тривалість перебування в режимі дуття практично ідентична для всіх ПН і становить 60 хв, а швидкість зниження температури протягом періоду дуття 1250-1000°C характеризується наступним співвідношенням:

$$v = \frac{1250 - 1100}{60} = 2,5^\circ\text{C/хв.}$$

При паралельному режимі роботи ця швидкість зменшується в два рази ($1,25^\circ\text{C/хв}$), оскільки через кожен повітрянагрівач проходить вдвічі менший обсяг дуття.

За умови однакової швидкості зниження температури при паралельній роботі ПН момент закриття 33 настає через однаковий проміжок часу від підключення нагрітого та відключення охолодженого повітрянагрівача. Це відбувається при досягненні заданого співвідношення температур t_{11} і t_{12} , коли нагрітий ПН знижує температуру до 1150°C , а охолоджений – до 1050°C , що задовольняє умовам як рівняння (2), так і рівняння (1).

Описане співвідношення є першим за часом, що настає в період дуття після підключення нагрітого повітрянагрівача з температурою 1250°C . Після відключення охолодженого та підключення нагрітого до 1250°C ПН функціонування в паралельному режимі продовжується до наступного закриття 33 та настання умов, що відповідають рівнянню (1). Таким чином, робота ПН у паралельному режимі набуває регулярного характеру, що дозволяє автоматизувати процес переключення повітрянагрівачів.

У випадку різної швидкості зниження температури дуття при паралельній роботі ПН визначення моменту переключення ускладнюється через можливе невиконання умов рівняння (2). За таких обставин відключення охолодженого ПН доцільно здійснювати в

момент зниження температури дуття більш нагрітого повітрянагрівача на 100°C (з 1250°C до 1150°C) від початку його підключення. При цьому охолоджений ПН може мати різну температуру дуття при відключенні, що вимагатиме різної тривалості його нагрівання. Проте при роботі чотирьох ПН існує часовий резерв для забезпечення необхідного нагрівання.

Залежність тривалості нагрівання ПН від часу дуття при послідовному режимі роботи описується наступним рівнянням [1]:

$$\tau_1 = (N - 1)\tau_2 - 2\tau_{\text{п}}, \quad (3)$$

де τ_1 – час періоду нагрівання ПН, хв;

τ_2 – час періоду дуття ПН, хв;

N – кількість працюючих ПН у блоці, шт;

$\tau_{\text{п}}$ – час паузи (час переведення ПН з режиму дуття в режим нагрівання або навпаки), хв.

Час нагрівання (3) відповідає максимально можливому часу при послідовному режимі ПН у блоці. Слід зазначити, що шляхом впровадження відповідних технічних заходів цей параметр може бути скорочений. Наприклад, за умови роботи трьох ПН у блоці ($N = 3$), час дуття $\tau_2 = 60$ хв, а час паузи $\tau_{\text{п}} = 15$ хв, максимально можливий час нагріву складає $\tau_1 = 2 \cdot 60 - 2 \cdot 15 = 90$ хв.

Швидкість нагрівання дорівнює:

$$v = \frac{1250 - 1100}{90} = 1,67^\circ\text{C/хв.}$$

При одночасній роботі чотирьох ПН максимально можливий час нагрівання складає:

$$\tau_1 = 3 \cdot 60 - 2 \cdot 15 = 150 \text{ хв.}$$

Час нагрівання 90 хв при цьому мінімально достатній для одержання потрібної температури склепіння ПН, тобто, при послідовному режимі роботи ПН можна працювати 3-ма ПН у блоці.

Тривалість функціонування в режимі дуття при паралельній роботі ПН від моменту підключення нагрітого та відключення охолодженого агрегата збільшується до

$$\tau = \frac{1250 - 1150}{1,25} = 80 \text{ хв,}$$

що на 20 хв перевищує показник послідовного режиму. Отже, через 80 хв повинен бути нагрітим раніше відключений ПН, а його нагрів, як зазначено вище, потребує 90 хв часу. Це означає, що наявність трьох працюючих ПН не забезпечує паралельний режим роботи двох ПН в режимі дуття. Ситуація зміниться, якщо буде задіяний четвертий ПН і при цьому він буде нагрітим через 80 хв після відключення третього ПН. Графіки роботи трьох ПН у послідовному режимі та чотирьох у паралельному для розглянутої ДП наведені на рис. 2.

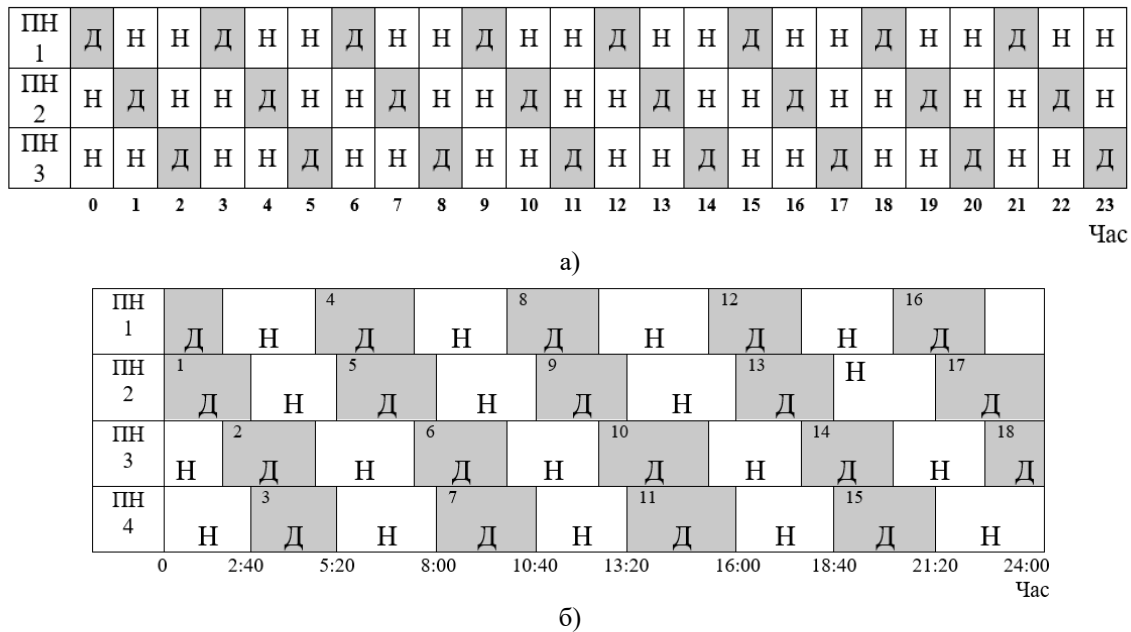


Рис. 2 – Графіки роботи блоку ПН у послідовному та паралельному режимах дуття: а) графік роботи 3-х ПН в послідовному режимі дуття; б) графік роботи блоку в паралельному режимі по два ПН (1-18 – номери і моменти переключень ПН). Д – робота в режимі дуття, Н – робота в режимі нагрівання

Відключений повітрянагрівач необхідно нагрівати від 1050°C до необхідної робочої температури 1250°C, що зумовлює збільшення тривалості його нагрівання порівняно з часом нагрівання при послідовному режимі експлуатації. Наприклад, для ДП об'ємом 2000 м³ при послідовному режимі нагрівання ПН від температури склепіння 1100°C до потрібної 1250°C (підвищення на 150°C) потребує 90 хв часу (швидкість нагріву 150/90 = 1,67 °C/хв), а при паралельному режимі нагрівання ПН від температури 1050°C до 1250°C (підвищення на 200°C) при лінійній залежності збільшення температури склепіння від часу (що підтверджується на практиці) потребує вже 200/1,67 = 120 хв. Таким чином, повний час роботи в режимі дуття кожного ПН в паралельному режимі буде дорівнювати:

$$\tau_2 = \frac{1250 - 1050}{1,25} = 160 \text{ хв.}$$

Час нагрівання складає:

$$\tau_1 = \frac{1250 - 1050}{1,67} = 120 \text{ хв.}$$

Відповідно до графіка роботи блоку ПН у паралельному режимі (рис. 2, б), тривалість нагрівання становить 160 хвилин, що забезпечує часовий резерв у 40 хвилин.

Експлуатація повітрянагрівачів у паралельному режимі порівняно з послідовним характеризується кількома суттєвими перевагами.

По-перше, досягається більш повне використання теплової енергії насадки ПН, оскільки тривалість дуття кожного повітрянагрівача збільшується з 60 хвилин при послідовному режимі до 160 хвилин у паралельному.

По-друге, забезпечується зменшення втрат тиску дуття на повітрянагрівачах. При функціонуванні у паралельному режимі обидва ПН на вході отримують розгалужений навіпіл потік холодного дуття, однаковий початковий тиск дуття та ідентичний тиск на виході (рис. 3).

Внаслідок цього, відповідно до формули Дарсі-Вейсбаха [9], перепад тиску (гідрравлічні втрати) зменшується за рахунок збільшення вдвічі прохідного перерізу для потоку дуття та зменшення вдвічі швидкості його руху через кожен з повітрянагрівачів. При роботі ПН у послідовному режимі втрати тиску на агрегаті визначаються наступним співвідношенням:

$$\Delta P_I = \Sigma \lambda_i \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} \rho,$$

де $\Sigma \lambda_i$ – сумарний коефіцієнт втрат тиску при русі потоку дуття в каналі ПН;

V_1 – швидкість руху потоку через ПН [м/с];

L_1 – довжина каналу руху потоку через ПН [м];

D_1 – узагальнений діаметр каналу руху потоку через ПН [м];

ρ – густина повітря дуття [кг/м³];

g – прискорення вільного падіння [м/с²].

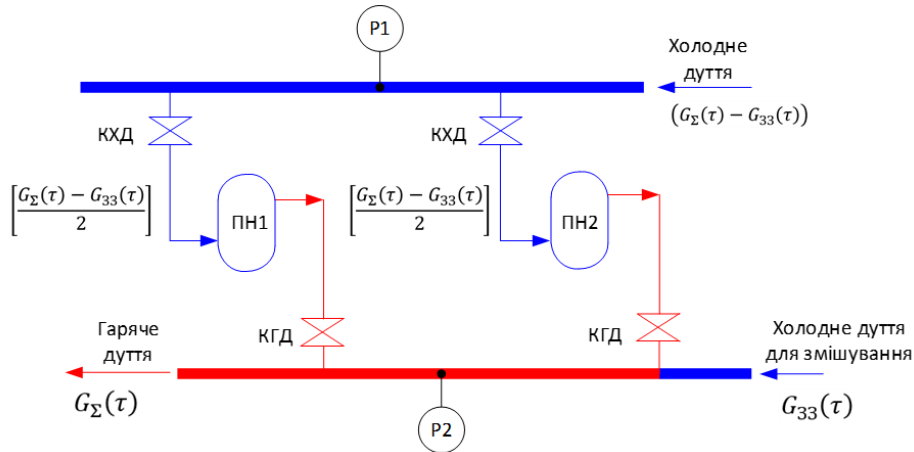


Рис. 3 – Технологічна схема паралельного режиму роботи на дутті двох ПН: КХД – клапан холодного дуття, КГД – клапан гарячого дуття, $G_{\Sigma}(\tau)$, $G_{зз}(\tau)$ – поточні значення кількості дуття загальної та для змішування відповідно

В паралельному режимі:

$$\Delta P_{\Pi} = \Sigma \lambda_i \frac{L_1}{2D_1} \frac{(0,5V_1)^2}{2g} \rho = \frac{1}{8} \Sigma \lambda_i \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} \rho = \frac{1}{8} \Delta P_I.$$

Таким чином, досягається зменшення втрат тиску у вісім разів, що призводить до підвищення тиску дуття на фурмах доменної печі та, як наслідок, до інтенсифікації процесу плавки.

По-третє, функціонування блоку ПН у паралельному режимі забезпечує зменшення кількості переключень повітрянагрівачів між станами дуття та нагрівання. Зокрема, для розглянутої ДП при експлуатації у послідовному режимі переключення здійснюються з

періодичністю 60 хв, що відповідає тривалості роботи ПН на дутті, тоді як при паралельному режимі інтервал між переключеннями збільшується до 80 хв. Відповідно, при послідовному режимі реалізується 24 переключення протягом доби, тоді як при паралельному режимі їх кількість скорочується до 18.

По-четверте, досягається зменшення максимальної кількості холодного дуття для змішування $G_{зз\text{ мр}}(\tau)$ з температурою 100°C у момент підключення нового ПН, нагрітого до температури 1250°C, та залишеного в режимі дуття ПН з температурою 1150°C. Для умов розглянутої ДП величина цього параметра визначається наступним чином:

$$G_{зз\text{ мр}} = G_{\text{мр}\Sigma} \frac{k \cdot 0,5 \cdot t_{11} \cdot C_{pT11}^M + k \cdot 0,5 \cdot t_{12} \cdot C_{pT12}^M - t_{\text{Дзад}} \cdot C_{pT\text{Дзад}}^M}{(1-k) \cdot t_{\text{Дзад}} \cdot C_{pT\text{Дзад}}^M + k \cdot 0,5 \cdot t_{11} \cdot C_{pT11}^M + k \cdot 0,5 \cdot t_{12} \cdot C_{pT12}^M - t_2 \cdot C_{pT2}^M}.$$

У представлену формулу підставлено відповідні значення всіх параметрів:

$$G_{зз\text{ мр}} = 77,4 \cdot \frac{0,9 \cdot [0,5 \cdot 1250 \cdot 1,216 + 0,5 \cdot 1150 \cdot 1,204 - 1100 \cdot 1,199]}{0,1 \cdot 1100 \cdot 1,199 + 0,45 \cdot 1250 \cdot 1,216 + 0,45 \cdot 1150 \cdot 1,204 - 100 \cdot 1,016]} = 6,949 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Це відповідає об'ємній кількості холодного дуття

$$G_{зз\text{ вр}} = \frac{6,949 \text{ кг/с}}{3,77 \text{ кг/м}^3} = 1,84 \text{ м}^3/\text{с},$$

в той час як при послідовному режимі роботи блоку ПН цієї ДП максимальна об'ємна кількість складає 2,6 м³/с.

Додатковою перевагою паралельного режиму є наявність часового резерву для нагрівання повітрянагрівачів, що підтверджується графіком їх роботи (рис. 2, б).

До недоліків паралельного режиму належить відсутність резервного ПН, оскільки всі чотири ПН блоку залучені до технологічного процесу. Проте при виході з ладу одного з повітрянагрівачів можливий оперативний перехід на послідовний режим із трьома ПН, що особливо ефективно реалізується при ручному способі переключення.

Блок-схема вибору режиму роботи блоку ПН та реалізації паралельного режиму наведена на рис. 4.

У блоці 1 здійснюється оцінювання основних параметрів роботи та поточного стану всіх повітрянагрівачів, зокрема працездатність кожного ПН, режим роботи, значення основних технологічних параметрів, швидкість зміни температурних характеристик тощо.

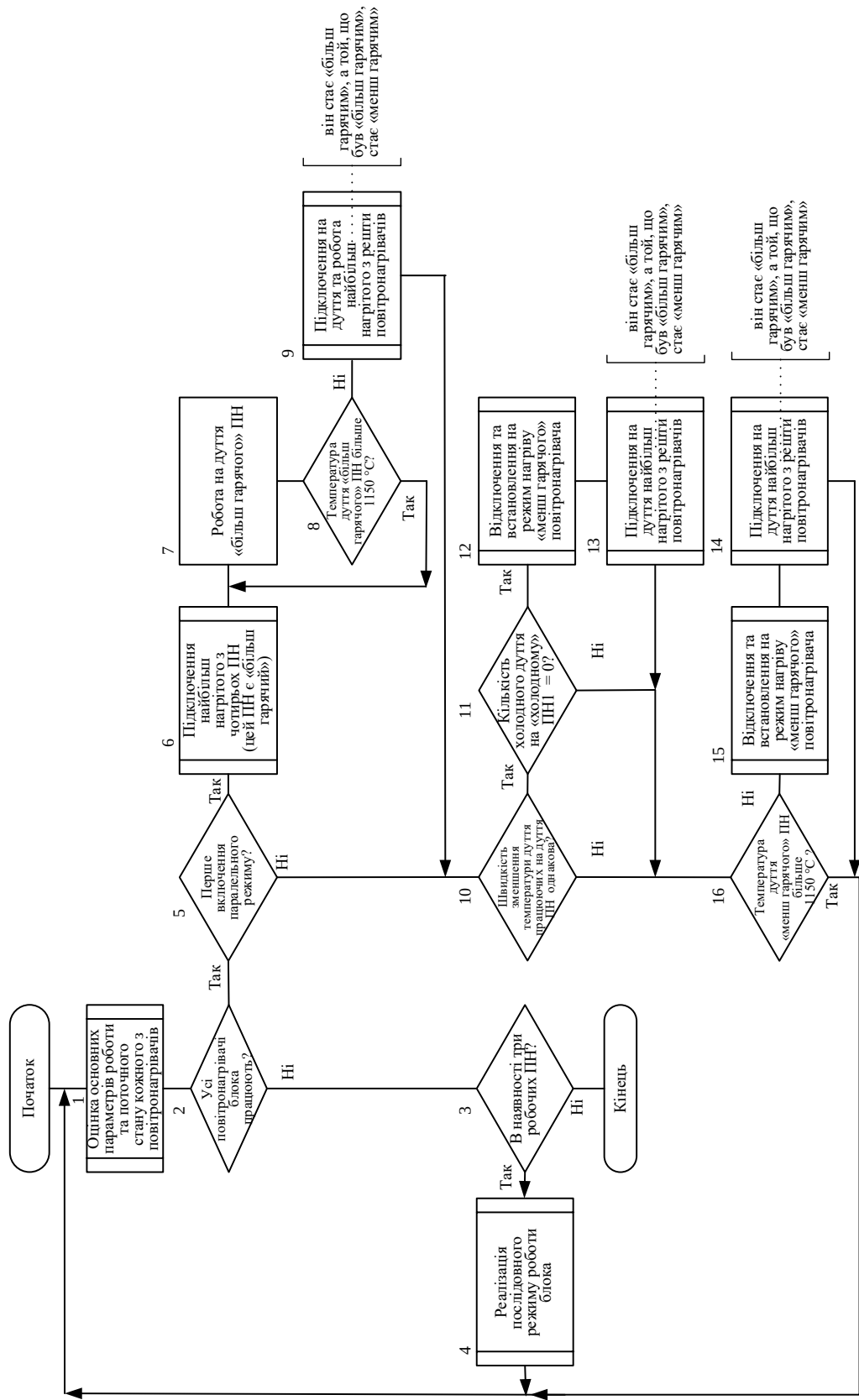


Рис. 4 – Блок-схема вибору режиму роботи та реалізації паралельного режиму роботи блока повітрянагрівачів доменної печі

За умови непрацездатності хоча б одного з чотирьох повітрянагрівачів реалізація паралельного режиму є неможливою, і робота блоку ПН продовжується в послідовному режимі (блоки 3, 4) за наявності трьох працездатних агрегатів. Якщо всі чотири ПН перебувають у робочому стані (блок 2), можлива експлуатація в паралельному режимі, і керування передається до блоку 5.

При першому активуванні паралельного режиму (блок 5) найбільш нагрітий з чотирьох повітрянагрівачів (він стає «більш гарячий») підключається (блок 6) і функціонує в режимі дуття (блоки 7, 8) до моменту зниження температури дуття до 1100°C. Після цього додатково активується (блок 9) найбільш нагрітий з трьох повітрянагрівачів, що залишилися (він стає «найгарячішим», тоді як ПН, що працював, переходить у статус «менш гарячого»). Таким чином забезпечується ініціація паралельного режиму роботи.

Якщо блок ПН вже функціонує в паралельному режимі (тобто перше активування вже відбулося), здійснюється перевірка (блок 10) відповідності швидкостей зниження температури на двох працюючих ПН. За умови їх ідентичності сигналом до відключення (і переведення в режим нагрівання) «менш гарячого» ПН є відсутність холодного повітря для змішування (блоки 11, 12, 13), після чого в режим дуття підключається наступний ПН. Якщо швидкості зниження температур дуття двох працюючих ПН є різними, таким сигналом слугує досягнення температури дуття на виході з «менш гарячого» ПН 1050°C та нижче (блоки 14, 15 та 16).

Запропонований алгоритм вибору режиму функціонування та реалізації паралельного режиму роботи блоку повітрянагрівачів (рис. 4) може бути інтегрований до автоматизованої системи керування блоком повітрянагрівачів [10].

Висновки

У статті обґрунтовано ефективність впровадження паралельного режиму функціонування двох повітрянагрівачів при нагріванні дуття у блоці чотирьох ПН доменної печі, що забезпечує суттєве підвищення стабільності температурного режиму потоку дуття та зниження гідравлічних витрат.

Розроблений алгоритм автоматичного керування дозволяє скоротити кількість переключень між режимами з 24 до 18 за добу. Разом із восьмиразовим зниженням витрат тиску це сприяє більш ефективному використанню теплової енергії регенератора.

Збільшення тривалості дуття одного ПН до 160 хв та оптимізація часу нагрівання на рівні 120 хв формують необхідний технологічний резерв для гнучкого регулювання параметрів процесу та мінімізації температурних коливань.

Практична реалізація запропонованої схеми не потребує значних капітальних інвестицій у модернізацію обладнання, що визначає її економічну доцільність

та забезпечує скорочення експлуатаційних витрат металургійного виробництва.

Перелік використаних джерел

- [1] Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.
- [2] Modern Blast Furnace Ironmaking / M. Geerdes et al. 4th ed. IOS Press, 2020. 274 p. DOI: <https://doi.org/10.3233/stal9781643681238>.
- [3] Blast Furnace and Stoves | Eurotherm. URL: <https://www.eurotherm.com/heat-treatment-articles/blast-furnace-and-stoves/> (дата звернення: 12.05.2025).
- [4] Кравченко В., Койфман О., Сімкін О. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17517.65761>.
- [5] Walsh G. C., Mitterer A. Cost effective operation of a blast furnace stove system. *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM, USA, 06 June 1997. Vol. 6. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.1997.609550>.
- [6] Costa W. B. da, Soares T. G., Souza L. E. de, Motta R. S. N. Blast Furnace Hot Stove Changeover by Thermal Control. 42^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13^o Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 October 2012. Vol. 6, no. 6. Pp. 80-90. DOI: <https://doi.org/10.5151/2594-357X-21537>.
- [7] Şahin A., Morari M. Optimizing control of hot blast stoves in staggered parallel operation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008. Vol. 41, no. 2. Pp. 1982-1987. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00337>.
- [8] Circular of the Bureau of Standards no. 564: Tables of thermal properties of gases comprising tables of thermodynamic and transport properties of air, argon, carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen, nitrogen, oxygen, and steam / J. Hilsenrath et al. Washington, DC, USA : National Bureau of Standards, 1955. 508 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/nbs.circ.564>.
- [9] Гідравліка : навч. посіб. / Возняк Л. В., Гімер П. Р., Мердх М. І., Паневник О. В. Івано-Франківськ : ІФНТУ, 2012. 327 с.
- [10] Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS / Koyfman O., Simkin O., Klimov Y., Scherbakov S. *Computer Modeling and Intelligent Systems: Proceedings of the 4th International Workshop, Zaporizhzhia*, 27 April 2021. Pp. 145-157. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmis/2864-13>.

CONTROL OF HOT BLAST STOVE GROUP
DURING PARALLEL BLAST OPERATION OF TWO STOVES

Kravchenko V.P.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8467-7796 , e-mail: kravchenko_vp@ukr.net ;
Koyfman O.O.	PhD (Engineering), associate professor, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2075-7417 , e-mail: aleksey.koyfman@mipolytech.education ;
Simkin O.I.	PhD (Engineering), professor, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9939-7866 , e-mail: a.i.simkin@mipolytech.education ;
Miroshnichenko V.I.	PhD (Engineering), associate professor, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5956-7867 , e-mail: v.i.miroshnichenko@mipolytech.education

The technological process of blast furnace smelting requires continuous supply of hot blast with stable temperature and flow rate parameters to the blast furnace. However, the formation of such a flow is characterized by cyclical nature due to the specific functioning of hot blast stoves as regenerative-type thermal units. Traditionally, blast furnaces utilize four hot blast stoves combined into a single technological unit, with sequential operation being the most widespread mode where one unit supplies blast while others undergo heating. Temperature stabilization during steady-state operation presents no technological difficulties; however, ensuring temperature stability during stove switching represents considerably greater complexity, as transitional periods are characterized by the most significant system disturbances, particularly substantial blast temperature excursions above nominal values that negatively impact the thermal balance of the blast furnace. This study aims to comprehensively analyze the parallel operation mode of two blast furnace hot blast stoves during hot blast formation. A mathematical model of parallel operation was developed to investigate its characteristic features and compare the effectiveness of parallel mode relative to traditional sequential operation schemes. The research establishes that during parallel operation, the cold air flow is divided equally between both stoves, and temperature stabilization is achieved through automatic regulation of cold air mixing in the hot blast pipeline. The condition for switching stoves is defined by the relationship whereby the sum of blast outlet temperatures from the hotter and cooler stoves must approximately equal twice the target blast temperature value when the mixing damper is fully closed. For a blast furnace with 2000 m³ volume, the parallel operation mode extends the blast period for each stove from 60 minutes in sequential mode to 160 minutes, while the heating period increases from 90 to 120 minutes, providing a 40-minute operational reserve. The research demonstrates that parallel operation achieves an eight-fold reduction in hydraulic pressure losses due to the doubled flow cross-section and halved velocity through each stove, decreases the number of daily switching operations from 24 to 18, and reduces maximum cold air mixing requirements from 2.6 to 1.84 m³/s at the moment of connecting a newly heated stove. An algorithmic framework for automatic control system integration is proposed, enabling selection of the optimal operation mode based on stove availability and operational parameters. The algorithm ensures adaptive transition between sequential and parallel modes depending on the technical condition of the equipment. The main limitation of parallel mode is the absence of a reserve stove, as all four units are involved in the technological process; however, rapid transition to sequential mode with three stoves remains possible in case of equipment failure. The scientific novelty lies in developing a mathematical description of parallel operation and establishing quantitative relationships between operational parameters. The practical significance is manifested in substantially improved thermal efficiency of regenerator energy utilization, enhanced blast temperature stability, reduced hydraulic losses leading to increased blast pressure at furnace tuyeres and intensified smelting process, and decreased frequency of transitional disturbances in the blast supply system. Further research directions include optimization of heating schedules and investigation of extended parallel operation modes under varying technological conditions.

Keywords: blast furnace, hot blast stove, parallel operation mode, stove switching conditions, blast pressure loss reduction, number of stove switches, switching algorithm, control system.

References

- [1] L. P. Gres, S. A. Karpenko, and A. E. Milenina, *Теплообmenniki domennykh pechey*. Dnipropetrovsk, Ukraine: Porogi, 2012.
- [2] M. Geerdes et al., *Modern Blast Furnace Ironmaking*. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2020. doi: 10.3233/STAL9781643681238.
- [3] Blast Furnace and Stoves – Eurotherm by Watlow. Eurotherm. [Online]. Available: <https://www.eurotherm.com/heat-treatment-articles/blast-furnace-and-stoves/>. Accessed on: December 10, 2024.
- [4] V. Kravchenko, O. Koifman, and O. Simkin, *Avtomatyziatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i*

vyrobnytstv u chornii metalurhii: navchalnyi posibnyk [Automation of technological processes and production in ferrous metallurgy: a textbook]. Odesa, Ukraine: Oldi+, 2023. doi: **10.13140/RG.2.2.17517.65761**. (Ukr.)

- [5] G.C. Walsh and A. Mitterer, "Cost effective operation of a blast furnace stove system," in *Proc. of the American Control Conference*, Albuquerque, NM, USA, June 06, 1997, vol. 6, pp. 3852-3856. doi: **10.1109/ACC.1997.609550**.
- [6] W.B. da Costa, T.G. Soares, L.E. de Souza, and R.S.N. Motta, "Blast Furnace Hot Stove Changeover by Thermal Control," in *Proc. of the 42^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 6th Int. Congress on the Science and Technology of Iron-making*, Rio de Janeiro, Brazil, Oct. 14-18, 2012, vol. 6, no. 6, pp. 80-90. doi: **10.5151/2594-357X-21537**.
- [7] A. Şahin and M. Morari, "Optimizing control of hot blast stoves in staggered parallel operation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 1982-1987, 2008. doi: **10.3182/20080706-5-KR-1001.00337**.
- [8] J. Hilsenrath et al., Circular of the Bureau of Standards no. 564: Tables of thermal properties of gases

comprising tables of thermodynamic and transport properties of air, argon, carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen, nitrogen, oxygen, and steam. Washington, DC, USA: National Bureau of Standards, 1955. doi: **10.6028/nbs.circ.564**.

- [9] L.V. Voznyak, P.R. Gimer, M.I. Merdukh, and O.V. Panivnyk, *Hidravlika: Navchalnyi posibnyk* [Hydraulics: a textbook]. Ivano-Frankivsk, Ukraine: IFNTUNG Publ., 2012. (Ukr.)
- [10] O. Koyfman, O. Simkin, Y. Klimov, and S. Scherbakov, "Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS," in *Proc. of the 4-th Int. Workshop «Computer Modeling and Intelligent Systems»*, Zaporizhzhia, April 27, 2021, pp. 145-157. doi: **10.32782/cmms/2864-13**.

Стаття надійшла 30.09.2025

Стаття прийнята 22.10.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Керування групою повітрянагрівачів доменної печі під час паралельної роботи на дутті двох повітрянагрівачів / Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І., Мірошніченко В. І. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 52. С. 140-150. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351016>.

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 504.05:62-577.3:536.7

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351065

ЕНТРОПІЙНИЙ ФАКТОР У ПРОЯВІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОРГАНІЧНИХ І НЕОРГАНІЧНИХ СИСТЕМ НА МЕЖІ СПІВІСНУВАННЯ ЛЮДИНИ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

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: vsvlshn52@gmail.com ;
Азархов О.Ю.	д-р мед. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-0616 , e-mail: azarhov_a_u@pstu.edu

У даній роботі зроблена спроба вивчити межу між органічною і неорганічною речовинами в зоні їх зіткнення в штучних системах, створених людиною. Такі системи в роботі умовно названі ES-системами, а їх компоненти «Org» і «InOrg» є підсистемами, межа взаємодії яких має характер співіснування або конфлікту, в залежності від умов досліджуваної взаємодії. За основу критерія такої взаємодії прийнята ентропія ES-системи, що обчислюється або визначається експериментально, в залежності від умов досліджуваної взаємодії. Встановлено, що на межі двох граничних підсистем у штучних ES-систем виникає термодинамічний потенціал у вигляді діапазону зміни ентропії для цих середовищ. Запропонована область перехідних процесів, пов'язаних зі зміною ентропії на умовній межі біологічної та неорганічної складових в найрізноманітніших варіантах, актуальних у зв'язку з розвитком потреб людини, має певні синергетичні властивості, що впливають на їх співіснування. При цьому органічна складова прагне до стану термодинамічної рівноваги, а неорганічна – до нерівноважного стану, таким чином, що виник перехідний процес, здатний характеризувати стійкість системи ЕС, а значить і здатність до запрограмованих станів, що забезпечують їх працездатність. Розглянуто деякі найбільш поширені ES-системи на основі біологічних та неорганічних компонентів, і на основі власних розрахунків, а також наявності результатів у літературі, зроблено спробу узагальнити закономірності таких перехідних процесів у галузі термодинаміки ES-систем як показника їх ефективності. Показано, що мінімальний діапазон зміни ентропії між «InOrg» та «Org» є основою функціональної координованої взаємодії в системах ES. Встановлено, що на межі двох середовищ – органічного та неорганічного, як двох граничних підсистем, у штучних ES-системах виникає термодинамічний потенціал у вигляді діапазону змінної ентропії. Мінімальна термодинамічна неупорядкованість між «InOrg» і «Org» лежить в основі функціональної координованої взаємодії в ES-системах і їх системних властивостях. До таких та подібних ним якостей у вже відомих ES-системах належать, зокрема, підвищена механічна міцність імплантатів, висока каталітична активність на межі органіки і неорганіки, висока селективність органічних напівпровідників і органічних світлодіодів, здатність модифікувати поверхні неорганічної речовини за допомогою органічних молекул, що розпиляються, та ін.

Ключові слова: біологічна система, неорганічна система, навколишнє середовище, граничні взаємодії, ентропія, перехідні процеси, стійкість.

Постановка проблеми

Розвиток інформаційних технологій, спрямування до технологічного об'єму 5.0 покладає на людину створення додаткових відносин із штучним інтелектом, різноманіттям технологічних процесів, у тому числі інтелектуально розвинених, глобальним інформаційним простором та різноманіттям надскладних мережових систем. Такі відносини викликають гостру дискусію про роль і місце людини в сучасному технологізованому світі, перспективи його розвитку і навіть існування. Потрібні більш точні і універсальні критерії для оцінки можливостей сучасного неорганічного світу, який все більше втручається в існування не тільки людини, але й інших складових органічного світу планети.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Співіснування двох, дещо протилежних, світів давно стало сучасною даністю. Це вуглецево-білковий світ, до якого відноситься і людина як об'єкт природи, та неорганічний світ кремнію і заліза, який в своїй штучній частині є продуктом людської діяльності. Людина – єдиний суб'єкт, який не тільки відноситься до цих двох світів, але і об'єднує їх. І, в той же час, розділяє. У зв'язку з цим представляє інтерес прикордонна частина співіснування цих досить різних за властивостями і призначенням систем.

У літературі накопичено багатий досвід теоретичних досліджень в області співіснування живої і неживої матерії. Це й теорія дисипативних структур І. Пригожина [1], згідно з якою живі системи використовують термодинамічно нерівноважні стани для створення порядку шляхом взаємодії з неорганічним

середовищем (наприклад, фотосинтез і сонячні батареї). Це гіпотеза аутопоеза Ж. Матурана і Ф. Вареля [2]: жива матерія самоорганізується і самовідтворюється, тоді як неорганічна матерія потребує зовнішнього контролю (імплантати в організмі). Концепція ексергії І. Дінцера [3] відображає однофункціональне перетворення енергії, з тією різницею, що жива система оптимізує ексергію для зростання, а неорганічна система оптимізує ексергію для рівноваги (мозок проти ШІ). Теорія симбіогенезу Л. Маргуліса [4] опосередковано пов'язана з темою пограниччя, підкреслюючи, що його властивості і синергізм (наприклад, біомінералізація) виникають в результаті співпраці органічного і неорганічного.

Прикордонна система між живою (вуглецево-білковою) і неживою (неорганічною) природою виникає там, де органічні і неорганічні системи тісно взаємодіють, виконуючи схожі функції і є дуже умовною. Описати цей феномен допомагають сучасні теорії, такі як теорія самоорганізації [5], біокібернетика, поняття ексергії.

Мета статті

Вивчити закономірності на межі двох середовищ – органічного та неорганічного в екологічних системах, створених людиною, з метою визначення їх стійкості та злагодженого існування.

Виклад основного матеріалу

Розглядаючи прикордонну зону між органічними і неорганічними середовищами, ми будемо називати її «прикордонною системою або *Edge System* – *ES*». А двома її складовими є підсистеми «*InOrg*» і «*Org*», що означає «*InOrganic*» і «*Organic*». Це легко записати у вигляді пояснювальної формули ($ES = IO + O$). До найбільш поширених типів граничних *ES*-систем відносяться:

- мозок та штучний інтелект (ШІ);
- імплантати в живу тканину;
- фотосинтез і неорганічні джерела енергії;
- урбосистема і навколишнє природне середовище;
- ентропія в живому і неорганічному середовищі та ін.

Деякі узагальнені характеристики якостей таких систем представлені в таблиці 1.

Ми будемо звертати увагу на ті властивості граничних зон, які є узагальнюючими і незалежними окремо від змісту «*Organic*» і «*InOrganic*». Наприклад, це може бути властивість взаємного проникнення двох різних частин, що визначається коефіцієнтом μ (%). Або енергетичні взаємодії, які пов'язані з прикордонними зонами.

Деякі узагальнені якості вуглецево-білкового і неорганічного світів

Якісна характеристика системи	Вуглецево-білковий світ	Неорганічний Світ
Структура	Самоорганізована, Ієрархічна	Кристалічна, аморфна, статична
Енергія	Хімічна (АТФ, глюкоза)	Електрична, механічна, теплова
Ентропія	Зниження локальної за рахунок зовнішньої	Зростання загальної, як результат дисипації
Адаптація	Висока (еволюція, навчання)	Низка (фіксована конструкція)
Швидкість процесів	Повільна, біологічна	Швидка, фізична
Довголіття	Обмежена (старіння)	Висока (стійкість матеріалів)

Область взаємного проникнення в прикордонну зону і пов'язаний з нею коефіцієнт μ показують ту частину простору *ES*-системи, до якої відносяться ті чи інші специфічні якості означених частин цієї системи і загальні для них властивості самої системи. Значення μ для кожного з них буде істотно відрізнятися і показувати ступінь впливу однієї частини на іншу і взаємно. Наприклад, система «урбосистема-навколишнє середовище» – це область взаємного проникнення фауни і флори на територію міста, з одного боку, і заміські культурні насадження, дачні ділянки, системи електропередачі, сміттєзвалища, з іншого. Для системи «мозок-штучний інтелект» така межа більше спрямована на впровадження людського мозку в створювані ним системи штучного інтелекту, ніж навпаки, наприклад, нейроінтерфейси, такі як *Neuralink*, *Synchron*, *NeuroPace* тощо [6]. Коефіцієнт μ є досить розпливчастим параметром. Він залежить від властивостей двох частин *ES*-системи і буде унікальним в кожному конкретному випадку. Тому його процентне співвідношення – це можливість для якісного аналізу властивостей самої системи.

На окрему увагу заслуговує така властивість *ES*-системи, як її енергетичний потенціал. Дві далеко не рівнозначні складові цієї системи «*Org*» і «*InOrg*», в залежності від їх змісту, мають різні електричні або дифузійні потенціали, різну концентрацію речовини на межі розділу середовищ, різні теплові коефіцієнти, градієнти температури і маси, нарешті, втрати енергії. Все це дозволяє судити про певний особливий енергетичний стан *ES*-систем як про їх значущу якість.

У даній роботі ми розглянемо, як змінюється ентропія досліджуваних систем на межі їх взаємодії в залежності від ступеня взаємного проникнення μ . Розрахункова динаміка змін ентропії для таких об'єктів, як *ES*-системи, дуже специфічна і вимагає певного

аналізу в зв'язку з низькою уніфікацією об'єктів аналізу. Наведемо низку прикладів.

ES-систему, що включає урбосистему, як представника «InOrg», і навколишній біологічний світ природи, віднесений до «Org», слід розглядати як систему з можливістю імпорту з навколишнього середовища низькоентропійних ресурсів, таких як енергія, товари і сировина, а також експорту високоентропійних ресурсів у вигляді відходів, тепла і забруднення. Це відповідає концепції дисипативних систем, де внутрішній порядок підтримується за рахунок наростаючого безладу в надсистемі. Така система відноситься до термодинамічно відкритих, в яких підсистема «Org» слабо нерівноважна або навіть рівноважна, а підсистема «InOrg» позиціонується як термодинамічно сильно нерівноважна. Тому при розрахунку ентропії в граничному шарі ES-системи будемо використовувати рівняння Л. Онсагера в узагальненому вигляді в першому випадку $\Delta S = \sum J_a X_a$ (стан слабкої нерівноважності на межі рівноважного стану), де J_a – матеріальні потоки, X_a – термодинамічні сили такі, що $J_a = \sum L_a X_a$, а L_a – феноменологічний коефіцієнт. А в другому випадку – рівняння Пригожина про зміну ентропії в сильно нерівноважних системах: $\frac{dS_0}{dt} = \sum \frac{J_a X_a}{T_a}$; і теорема про якість ентропії $\frac{dS_{tot}}{dt} = \frac{dS_{int}}{dt} + \frac{dS_{ext}}{dt} \geq 0$, де S_{tot} – повна ентропія, S_{int} – внутрішня ентропія, S_{ext} – зовнішня ентропія.

В залежності від заданих вихідних умов: зміни теплового режиму на кордоні підсистем, температурного режиму і кількісної потужності штучних споруд і систем в «InOrg» для середньостатистичного міста США з населенням в 1 млн осіб і енергоспоживанням 10 ТВт·год ($9,86 \cdot 10^{13}$ Дж/сут. при середній температурі навколишнього середовища 288 К (15°C), розрахуємо значення ентропії для ES-системи «урбосистема – навколишнє середовище». Додаткові дані для оцінкового розрахунку (можуть змінюватися в залежності від щільності населення, економічної структури та клімату), а саме:

- задана площа міста – 700 км²;
- середня ширина рекреаційної зони навколо міста – 10 км;
- орієнтовна кількість і вага всіх будівель і споруд в місті – 250 тисяч (10^9 т)
- маса всіх промислових систем в місті – $5 \cdot 10^6$ т;
- передбачувані матеріальні потоки, що спрямовуються в місто (товари, сировина) – $2,74 \cdot 10^4$ т/добу;
- передбачувані матеріальні потоки, що вивозяться з міста (відходи, матеріали, забруднення) – $2,74 \cdot 10^4$ т/добу;
- градієнти температури і концентрації в ES-системі;
- теплові потоки, що залишають місто – $9,86 \cdot 10^{10} \frac{\text{кДж}}{\text{добу}}$;

- встановлена концентрація пилу в місті – $4,5 \cdot 10^{-5}$ г/м³;
- типова біомаса для лісів – 135 т/га, для степів – 4 т/га;
- орієнтовна зелена маса лісів та степів навколо міста – $2,92 \cdot 10^7$ т
- задана площа водних об'єктів навколо міста – $7 \cdot 10^7$ м²;
- заданий обсяг повітря (задана висота шару в 10 км), здатний впливати на стан атмосфери в місті – $7 \cdot 10^{12}$ м³;
- концентрація пилу в зоні навколо міста – $1,5 \cdot 10^{-5}$ г/м³;
- встановлена ступінь поглинання пилу і газів в навколишньому середовищі становить 20%;
- енергія фотосинтезу зеленої маси навколо міста – $2,35 \cdot 10^{14} \frac{\text{Дж}}{\text{год}} = 6,4 \cdot 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{добу}}$;

Параметричний діапазон взаємного проникнення μ вимірюється в кілометрах.

Результати дослідження деяких термодинамічних параметрів, що зв'язують області ES-системи з її синергетичними властивостями, представлені на рис. 1.

Як і очікувалося, підсистема «Org» має більш низькі значення ентропії. Вона включає в себе також мінливі умови теплового режиму поблизу від насичених теплом урбосистем, від вихідних температурних параметрів яких дуже залежать органіка, зокрема, кліматичні ефекти, біогеохімічні цикли. Для підсистеми «Org» передбачувана ентропія складається з: $S_{Org} \approx +(0,226 \div 0,461) \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$ для екосистем, таких як листяні ліси, річки та озера; $S_{Org} \approx -0,422 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$ – для замських пасовищ, де обмінні процеси більш складні.

Використовуючи розраховані дані, покажемо, що щорічна зміна ентропії $\Delta S_{NonOrg} \approx +1,25 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{К}$ або $\approx +3,42 \cdot \frac{10^{11} \text{ Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} \approx +0,0198 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$ і показує на деградацію граничної області ES-системи. В цілому ми бачимо стрибок ентропії на кордоні ES-системи (див. рис. 1). Урбосистема, яка готова до збільшення організованості, пригнічує навколишнє середовище, яке, в свою чергу, здійснює спротив особистій дезорганізації. Можливий варіант, коли внутрішня ентропія урбосистеми стає негативною або близькою до нуля, оскільки місто підтримує власний порядок за рахунок імпорту ресурсів.

Однак загальний баланс завжди позитивний, так як завжди включає експорт ентропії в природу, необхідний для підтримки структури самої урбосистеми. У свою чергу, природа приймає зростання ентропії, що проявляється в її забрудненні, появі острівців тепла та інших формах деградації. «Теплові острови» змінюють місцевий клімат, збільшуючи ентропію через розсіювання тепла.

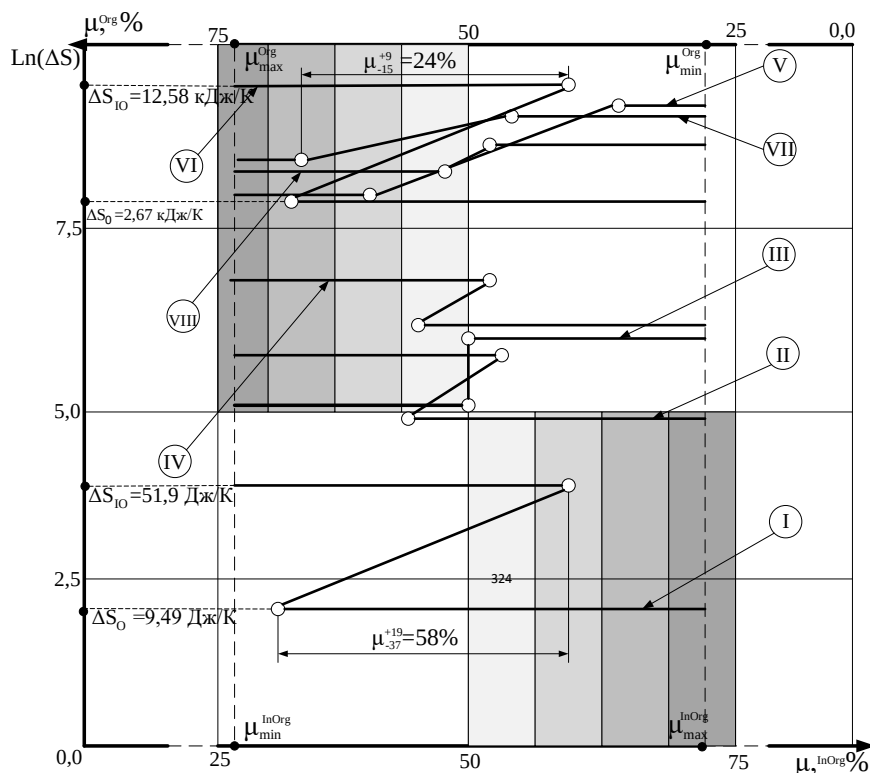


Рис. 1 – Межі зміни ентропії в деяких *ES*-системах в залежності від параметра μ . (Тут ентропія, що записана через натуральний логарифм, вимірюється в Дж/К)

Ще одна специфічна *ES*-система, яка описує граничну область, це та, в якій співіснують системні якості людського мозку і штучного інтелекту. Вона несе в собі якості мінливої термодинамічної ентропії (ΔS), що визначається через енергію, що споживається як мозком, так і технічними системами, що забезпечують функціонування штучного інтелекту, відповідно, яка описує дві підсистеми «*Org*» і «*InOrg*», виходячи з їх функціонального призначення [6]. Перша частина розраховується за відомими формулами С. Больцмана, а друга пов'язана з формулою К. Шеннона, з подальшим порівнянням фізичних величин за відомою методикою, де $S[\text{Дж/К}] = k \cdot \ln(2^H) = 0,956 \cdot 10^{-23} H$, де H вимірюються в бітах.

Наведемо основні вихідні дані для розрахунку ентропії для *ES*-системи «мозок-штучний інтелект». Для мозку це:

- споживана потужність 20 Вт (метаболічне споживання);
- робоча температура 310 К;
- швидкість обробки інформації 10 біт/с (для когнітивних завдань до 20 біт/с).

Для штучного інтелекту:

- споживана потужність 100-1000 Вт;
- робоча температура 300 К;
- швидкість обробки інформації, залежить від поставленого завдання (10^{15} 1/с).

Параметричний діапазон взаємного проникнення μ вимірюється в бітах інформації.

У самому приблизному вигляді розрахунки підтверджують, що для 86 мільярдів нейронів в мозку людини при споживанні близько 20 Вт зовнішньої енергії відбувається збільшення ентропії $\Delta S_{Org} = +5,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} = +64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$, а інформаційна ентропія мозку при швидкості обробки даних 10^{15} операцій в секунду $H_{Org} = +0,8 \cdot 10^9$ біт або $+0,76 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} = +6,910^{-20} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$. Для технічної системи, що забезпечує роботу штучного інтелекту (задана потужність 100-1000 Вт) з розмірністю 32 біта, в залежності від обсягу (10^9 параметрів), а також структури даних і використовуваних алгоритмів, опосередковані дані мають такий вигляд: $\Delta S_{InOrg} = +7,8 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{длбу}} = +9,02 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$, тобто на порядки вище, а інформаційна ентропія при швидкості обробки інформації 10^{17} операцій в секунду $H_{InOrg} = +32 \cdot 10^9$ біт або $+30,6 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} = 3,5 \cdot 10^{-18} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$.

Перехідний характер зміни ентропії в таких *ES*-системах очевидний, а сама перехідна функція може бути не тільки гладкою, але навіть бінарною, що відображає невизначеність в *ES*-системі при такому перехідному процесі. Слід зазначити, що процедури

вивчення ентропії для *ES*-систем дуже складні, і в кожному варіанті досліджуваної *ES*-системи вимагає свого персонального підходу. Тим не менш, такі розрахунки можна привести до засвоюваного результату, який дозволить ефективно проаналізувати ці дані.

На рисунку 1 показані інші області для μ , де мають вигоди специфічні властивості деяких *ES*-систем, що описані в таблиці 2 і складаються з двох підсистем: «*InOrg*» і «*Org*». Перетин ентропії при переходах в області *ES*-системи може відбуватися як поступово – від «*InOrg*» до «*Org*», так і навпаки, від «*Org*» до «*InOrg*» і по низхідній, в тому ж порядку. Це по різному може характеризувати кожну з *ES*-систем. Наприклад, *ES*-система «мозок-штучний інтелект» характеризується

низхідним вектором стрибка зміни ентропії в бік підсистеми «*Org*», в якій підсистема «*InOrg*» схильна до великих змін ентропії ($\Delta S_{InOrg} = +51,9$ Дж/(кгК)), як менш організована, ніж мозок ($\Delta S_{Org} = +9,49$ Дж/(кгК)). Тобто в *ES*-системі очевидні переваги органічного над неорганічним.

Розглянуті таким же чином *ES*-системи, позначені на рис. 1 як II, III, IV, показують такі ж самі результати. Їх відмінною рисою є те, що в ній бере участь людина, як підсистема «*Org*», на відміну від *ES*-систем, де участь людини або опосередкована, або має іншу органічну складову (поз. V, VI, VII, VIII на рис. 1).

Таблиця 2

Перехідні процеси в змінах ентропії на межі органічних і неорганічних систем

№№ п/п	ES-система: « <i>Org</i> » « <i>InOrg</i> »	Діапазон зміни ентропії, Дж/(кгК)	Діапазон зміни коефіцієнта μ , %	Вектор напрямлення зміни ентропії	
				Зріст ентропії <i>ES</i> -системи	Зменшення зросту ΔS
I	«О» - мозок; «ІО» - штучний інтелект.	9,49÷51,9	$\mu_{-37}^{+19} = 56$	-	+
II	«О» -біолог. тканина «ІО»- імплантати	141,2÷361,4	$\mu_{-5,5}^{+3} = 8,5$	-	+
III	Біомінералізація «О» - біолог. тканина «ІО» - мінерали	165,7÷518,0	$\mu_{-0}^{+0} \approx 0$	+	-
IV	«О» - ензими «ІО»-каталізатори	601,8÷1043,1	$\mu_{-5,2}^{+3,0} = 8,2$	-	+
V	«О»-біоенергія «ІО»-штучна енергія	3294÷8955	$\mu_{-9}^{+13,5} = 22,5$	+	-
VI	«О»-навк.прир.серед. «ІО»- урбосистема	2670÷12580	$\mu_{-15}^{+9} = 24$	-	+
VII	«О»-біомембрана «ІО»-фільтр	4023÷9996	$\mu_{-14}^{+4} = 18$	+	-
VIII	Нановироби «О»-орган.компон. «ІО»-неорг. компонент.	3133÷4675	$\mu_{-2,5}^{+2,1} = 4,6$	+	-

Для деяких *ES*-систем можуть спостерігатися взаємно протилежні тенденції. Наприклад, для *ES*-системи «нанотехнології», переважне зростання ентропії стосується до неорганічної складовій «*InOrg*» ($\Delta S = +4447$ Дж/(кгК)), а її органічна складова показує на спрямованість до відносно більшої організованості, що має вираз у мінімізації зростання її ентропії ($\Delta S = +3294$ Дж/(кгК)). Більш того, як показують графіки I, II, IV, VI, в разі активної участі людини в таких системах їх стан стає явно більш стійким, а термодинамічно нерівноважна *ES*-система прагне до впорядкованості і підлягає відповідним дослідженням. В інших випадках для *ES*-системи характерне зростання інтегральної ентропії або прагнення до термодинамічної рівноважності.

Ми маємо справу з деякою новою якістю *ES*-систем, яка не описана в доступній літературі. Ентропійні перехідні процеси в певному розрізі живого та неживого можуть вказувати на певні зміни в стійкості *ES*-системи, її відношенні до термодинамічної рівноважності, спрямованості деяких процесів. Вони можуть бути пов'язані з якісними змінами співвідношення «*Org*» та «*InOrg*» в області фізичного або інформаційного розділу. Можливо, ця якість носить системний характер. У цьому випадку особливості або закономірності *ES*-системи можуть стати джерелом нових знань про природу людської діяльності, яка сама, будучи похідною від біологічного світу, створила свій специфічний неорганічний світ, який здатний конкурувати, і вже конкурує, з біологічним світом, здатний

співіснувати з ним, в залежності від таких унікальних властивостей, що знаходяться на кордоні цих двох світів.

Серед відомих синергетичних властивостей, що виникають в *ES*-системах, відзначимо ті, які характеризуються різким перехідним процесом при незначних змінах ентропії між шарами «*Org*» і «*InOrg*» *ES*-систем.

До них відносяться, наприклад, деякі біокаталітичні системи з адсорбцією пропану на цеолітах, такі, що різкі перехідні процеси при зміні ентропії коливаються від 47,7 до 103,8 Дж/(моль·К) при ступені адсорбції 3% (дані отримані в результаті експериментів і термодинамічних розрахунків [7]).

До наступних синергетичних властивостей, що пов'язані з *ES*-системами для відомих органічних і неорганічних кластерів, що взаємодіють, можна віднести підвищену механічну міцність на межі органічних і неорганічних матеріалів, наприклад, кісткових з'єднань [8]. Підтверджені дані показують, що перехідний процес між ентропійними станами в такій *ES*-системі найменше складає -0,34 Дж/(кг·К) в напрямку зниження ентропії.

Експериментально підтверджена амплітуда перехідного процесу, пов'язана зі станом ентропії на кордоні біологічної *ES* - системи «ліганд-платина» досить висока в діапазоні +(1682.1÷3045.6) Дж/(кг·К).

Далеко не для всіх перерахованих вище властивостей можна знайти опубліковані дані про встановлені перехідні процеси для ентропії на кордоні «*InOrg*» і «*Org*» в якості аргументу на користь ефекту *ES*-систем в зв'язку зі складністю відповідних досліджень. Як правило, цьому повинні передувати реальні експерименти. Тим не менш, системні властивості *ES*-систем що знаходяться на межі двох підсистем «*InOrg*» і «*Org*», у багатьох випадках підтверджуються і мають право на існування.

Висновки

1. Встановлено, що на межі двох середовищ – органічного та неорганічного, як двох граничних підсистем, у штучних *ES*-системах виникає термодинамічний потенціал у вигляді діапазону змінної ентропії. Як правило, такі перехідні процеси дають уявлення про нові цікаві властивості систем, що їх створюють, а саме про можливість виникнення синергетичних явищ в

області стійкості цих співіснуючих і конкуруючих систем в їх найбільшій різноманітності.

2. Мінімальна термодинамічна неупорядкованість між «*InOrg*» і «*Org*» лежить в основі функціональної координованої взаємодії в *ES*-системах і їх системних властивостях.

3. До таких якостей у вже відомих *ES*-системах належать, зокрема, підвищена механічна міцність імплантатів, висока каталітична активність на межі органіки і неорганіки, висока селективність органічних напівпровідників і органічних світлодіодів, здатність модифікувати поверхні неорганічної речовини за допомогою органічних молекул, що розпиляються, та ін.

Перелік використаних джерел

- [1] Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. London: Heinemann, 1984. 349 p.
- [2] Maturana H. R., Varela F. J. Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1980. 141 p.
- [3] Dincer I., Rosen M. A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68369-6>.
- [4] Margulis L. Symbiosis in Cell Evolution. 2nd ed. New York: W.H. Freeman, 1993. 452 p.
- [5] Nicolis G., Prigogine I. Exploring Complexity: An Introduction. New York: W.H. Freeman and Company, 1989. 313 p.
- [6] Волошин В. С., Азархов О. Ю. Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 48. С. 111-120. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310695>.
- [7] Time distribution of adsorption entropy of gases on heterogeneous surfaces by reversed-flow gas chromatography / N. A. Katsanos et al. *Journal of Chromatography A*. 2006. Vol. 1127, iss. 1-2. Pp. 221-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.05.067>.
- [8] Crystallinity and solubility characteristics of hydroxyapatite adsorbed amino acid / T. Matsumoto et al. *Biomaterials*. 2002. Vol. 23, iss. 10. Pp. 2241-2247. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00358-1).

ENTROPY FACTOR IN THE MANIFESTATION OF PROPERTIES OF ORGANIC AND INORGANIC SYSTEMS ON THE BORDER OF COEXISTENCE BETWEEN MAN AND THE ENVIRONMENT

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;

Azarkhov A.Yu.

D.Sc. (Medical Sciences), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-0616>, e-mail: azarhov_a_yu@pstu.edu

In this work, an attempt is made to study the boundary area between organic and inorganic matter in the area of their contact in artificial systems created by man. Such systems are conventionally called ES-systems, and their components «Org» and «InOrg» are subsystems, the boundary of interaction of which is of the nature of coexistence or conflict, depending on the conditions of the interaction under study. The conditions for thermodynamic relations in the boundary region of the ES system are determined, and, depending on the degree of thermodynamic disequilibrium, the entropy of each of the subsystems is determined. It has been established that at the boundary of two boundary subsystems, a thermodynamic potential arises in artificial ES systems in the form of a range of changing entropy for these environments. The area of transient processes associated with changes in entropy at the conditional boundary of the biological and inorganic worlds in a variety of variants relevant in connection with the development of human needs is considered, and has certain synergetic properties that affect their existence. to characterize the stability of the ES system, and hence the ability to programmatic states that ensure their operability. The most common ES systems based on biological and inorganic components are considered, and on the basis of our own calculations, as well as the data available in the literature, an attempt is made to generalize the regularities of such transient processes in the field of thermodynamics of ES systems as an indicator of their efficiency. It is shown that the minimal thermodynamic disorder between «InOrg» and «Org» is the basis of functional coordinated interaction in ES systems. It has been established that at the boundary of two media - organic and inorganic, as two boundary subsystems, a thermodynamic potential arises in the form of a range of variable entropy in artificial ES systems. The minimal thermodynamic disorder between «InOrg» and «Org» underlies the functional coordinated interaction in ES systems and their system properties. Such and similar qualities in already known ES systems include, in particular, increased mechanical strength of implants, high catalytic activity at the interface of organic and inorganic, high selectivity of organic semiconductors and organic LEDs, the ability to modify the surfaces of inorganic matter using atomized organic molecules, etc.

Keywords: biological system, inorganic system, environment, boundary interactions, entropy, transients, stability.

References

- [1] I. Prigogine, and I. Stengers, *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. London, UK: Heinemann, 1984.
- [2] H.R. Maturana, and F.J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel Publishing, 1980.
- [3] I. Dincer, and M.A. Rosen, *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013. doi: 10.1016/C2010-0-68369-6.
- [4] L. Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution*, 2nd ed. New York, USA: W.H. Freeman, 1993.
- [5] G. Nicolis, and I. Prigogine, *Exploring Complexity: An Introduction*. New York, USA: W.H. Freeman and Company, 1989.
- [6] V.S. Voloshyn, and A.Yu. Azarkhov, "Konkurentsia ta perspektyvy bilkovo-vuhletsevykh ta spetsyfichnykh neorhanichnykh ekosystem na Zemli" ["Competition and perspectives of protein-carbon and specific inorganic ecosystems on Earth"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 48, pp. 111-120, 2024. doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310695.
- [7] N.A. Katsanos et al., "Time distribution of adsorption entropy of gases on heterogeneous surfaces by reversed-flow gas chromatography," *Journal of Chromatography A*, vol. 1127, iss. 1-2, pp. 221-227, 2006. doi: 10.1016/j.chroma.2006.05.067.
- [8] T. Matsumoto, M. Okazaki, M. Inoue, Y. Hamada, M. Taira, and J. Takahashi, "Crystallinity and solubility characteristics of hydroxyapatite adsorbed amino acid," *Biomaterials*, vol. 23, iss. 10, pp. 2241-2247, 2002. doi: 10.1016/S0142-9612(01)00358-1.

Стаття надійшла 30.10.2025

Стаття прийнята 27.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Волошин В.С., Азархов О.Ю. Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 151-157. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351065>.

ДІАГНОСТИКА ТА КОНТРОЛЬ СПУХАННЯ АКТИВНОГО МУЛУ
НА БІОЛОГІЧНИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ

Копаниця О.Б.

провідний судовий експерт Лабораторії досліджень об'єктів навколишнього середовища та екологічних досліджень Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України; аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>, e-mail: ecology.expert.2020@gmail.com

У статті розглянуто проблему виносу активного мулу з вторинних відстійників біологічних очисних споруд на основі найсучасніших досліджень 2023-2025 років. Актуальність дослідження обумовлена тим, що спухання мулу не лише погіршує якість очищених стоків, але й підвищує ризики розповсюдження генів антибіотикорезистентності. Метою роботи є комплексний аналіз проблеми з акцентом на інноваційні методи діагностики та контролю. Дослідження базується на систематизації наукових публікацій, присвячених молекулярним механізмам спухання мулу, діагностичним технологіям та стратегіям контролю. Проаналізовано роль екстрацелюлярних полімерних речовин та нитчастих бактерій з використанням протеомічних методів та високопродуктивного секвенування. Розглянуто застосування методів машинного навчання для раннього виявлення спухання та біологічні методи контролю. Встановлено, що зміни у складі екстрацелюлярних полімерних речовин призводять до електростатичного відштовхування між бактеріальними клітинами. Ідентифіковано 94 види нитчастих бактерій, понад 74% яких містять гени антибіотикорезистентності. Показано, що динамічні графові згортові мережі дозволяють досягти точності виявлення спухання 99% з нульовою кількістю хибних тривог. Метод періодичного голодування забезпечує зниження рясності *Thiothrix* з понад 50% до менше 1% протягом 14 діб. Біологічні методи з використанням бактеріофагів дозволяють специфічно таргетувати проблемні види без негативного впливу на функціональні групи мікроорганізмів. Наукова новизна полягає у систематизації найсучасніших досягнень у розумінні молекулярних механізмів спухання та інноваційних підходів до його діагностики і контролю. Практична значущість результатів полягає у можливості впровадження описаних методів на реальних очисних спорудах для підвищення надійності роботи систем біологічного очищення. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку специфічних біологічних агентів, удосконалення алгоритмів машинного навчання та створення інтегрованих систем управління.

Ключові слова: активний мул, спухання мулу, винос біомаси, нитчасті бактерії, високопродуктивне секвенування, машинне навчання, діагностика, біологічний контроль.

Постановка проблеми

Процес біологічного очищення стічних вод методом активного мулу залишається найпоширенішою технологією на комунальних та промислових очисних спорудах у всьому світі.

Однак проблема спухання та виносу активного мулу продовжує бути критичним викликом для ефективної експлуатації систем біологічного очищення. Спухання мулу характеризується погіршенням седиментаційних властивостей біомаси внаслідок надмірного розвитку нитчастих бактерій, що призводить до виносу твердих часток з вторинних відстійників та погіршення якості очищених стоків [1, 2].

За оцінками 2023-2024 років глобальні очисні споруди генерують понад 103 мільйони тонн надлишкового активного мулу на рік у перерахунку на вологу масу [3].

Винос мулу не лише погіршує якість стоків, але й створює екологічне, економічне та санітарне навантаження на системи водовідведення.

Сучасні дослідження 2024-2025 років продемонстрували, що спухання мулу може також підвищувати ризики розповсюдження генів антибіотико-резистентності, що додає нові виміри до розуміння цієї проблеми [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження останніх років виявили критичну роль екстрацелюлярних полімерних речовин у механізмах спухання мулу, зокрема вплив змін у співвідношенні полісахариди/білки на седиментаційні властивості [5, 6]. В огляді 2024 року детально описано та систематизовано дані про 94 види нитчастих бактерій, що належать до шести філумів [7]. Глобальне дослідження, проведене наступного року, виявило значні регіональні відмінності у розповсюдженні філаментів [8]. Важливим відкриттям став зв'язок нитчастих бактерій з генами антибіотикорезистентності – 74,84% нитчастих бактерій мають принаймні один такий ген [4, 9]. Це відкриває нові виміри в розумінні екологічних ризиків спухання мулу. Було зареєстровано прорив у розробці методів машинного навчання для діагностичних цілей. Динамічна графова згортовка мережа показала точність 99% [10], тоді як гібридні системи ELM-DBN показали точність до 98,39% [11]. Однак високопродуктивне секвенування та технології FISH значно покращили можливості виявлення ниткоподібних бактерій [2, 12]. Найновіший підхід полягає в розробці методів біологічного контролю з використанням бактеріофагів. Специфічні фаги зменшують кількість проблемних філаментів до 83% [1, 2]. Метод кворумного

гасіння, що блокує сигнали AHL, також дає хороші результати [13].

Однак, незважаючи на значний прогрес, досягнутий у розумінні окремих аспектів, пов'язаних з цим питанням, існуючі роботи залишаються фрагментарними та не дають цілісного міждисциплінарного погляду на проблему спухання мулу. Тому в цій статті проведено детальний систематичний огляд сучасних методів як діагностики, так і контролю накопичення активного мулу разом із практичними рекомендаціями, що стосуються різних типів очисних споруд, щоб можна було сформулювати міждисциплінарне розуміння проблеми, що охоплює досягнення молекулярної біології, біоінформатики та технологічних процесів.

Мета статті

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі проблеми виносу активного мулу на основі найсучасніших наукових публікацій за період з 2020 року по 2025 рік з акцентом на інноваційні методи діагностики та контролю.

Завдання дослідження включають систематизацію сучасних знань про молекулярні механізми спухання мулу, огляд передових діагностичних технологій на основі машинного навчання та високопродуктивного секвенування, а також узагальнення ефективних стратегій біологічного та процесного контролю спухання.

Виклад основного матеріалу

Дослідження останніх років продемонстрували критичну роль екстрацелюлярних полімерних речовин у механізмах спухання мулу.

Комплексний аналіз на основі протеомічних методів виявив, що під час спухання вміст екстрацелюлярних полімерних речовин поступово зменшується від 210,23 мг/г летких завислих речовин до 131,34 мг/г [5]. Особливо значущим є зниження вмісту білків від 173,33 мг/г до 95,42 мг/г при одночасному збільшенні полісахаридів.

Ключовим механізмом погіршення седиментації виявилось електростатичне відштовхування між бактеріальними клітинами. Надмірний розвиток нитчастих бактерій суттєво впливає на молекулярні функції екстрацелюлярних білків та метаболічні шляхи екстрацелюлярних полімерних речовин. Зокрема, відбувається зменшення синтезу гідрофобних амінокислот та збільшення синтезу гідрофільних, що призводить до формування пухкої структури пластівців з поганою здатністю до осадження [5].

Додаткові дослідження 2023 року підтвердили, що зміни у співвідношенні полісахариди/білки в екстрацелюлярних полімерних речовинах можуть індукувати нефіламентозне спухання мулу навіть за відсутності масового розвитку нитчастих бактерій [14]. Це розширює розуміння механізмів спухання beyond

традиційної парадигми, що фокусувалася виключно на нитчастих організмах.

Детальний огляд популяційного складу, фізіології та екології нитчастих бактерій, опублікований у 2024 році, систематизував дані про дев'яносто чотири види нитчастих бактерій, що належать до 6 філумів та 42 родів [7]. Ядро нитчастих бактерій у спухлому активному мулі включає *Microthrix parvicella*, тип 0092, *Mycobacterium fortuitum* та інші види.

Тривалі дослідження популяційної динаміки нитчастих бактерій на 28 очисних спорудах з видаленням біогенних елементів у Данії продемонстрували, що нитчасті організми становили в середньому 24% від загальної мікробної спільноти [15].

Незважаючи на те, що більшість нитчастих бактерій знаходилася всередині пластівців, вони періодично викликали проблеми з осадженням на більшості станцій. Виявлено низьку різноманітність нитчастих бактерій з домінуванням *Microthrix* та різних видів, що належать до філumu *Chloroflexi*, включаючи типи 0803 та 0092.

Особливо важливим є відкриття 2024 року про зв'язок нитчастих бактерій з генами антибіотикорезистентності. Дослідження виявили, що 74,84% нитчастих бактерій містять принаймні один ген антибіотикорезистентності, причому частота виявлення таких генів у нитчастих організмів приблизно в 1,5 рази вища, ніж у загальній бактеріальній популяції активного мулу [4]. Геномний та метагеномний аналіз показав, що гени антибіотикорезистентності у нитчастих бактеріях тісно пов'язані з мобільними генетичними елементами та часто виявляються у потенційно патогенних бактеріях, що підкреслює додаткові ризики, пов'язані з цими мікроорганізмами.

Дослідження 2024-2025 років виявили значний вплив складу органічних речовин стічної води на розвиток спухання мулу. Результати досліджень свідчать, що повільно біодеградуючі органічні сполуки призводять до концентрованого розподілу мікроорганізмів всередині пластівців з ростом нитчастих бактерій всередину [16]. Системи, що оброблювали Tween-80 та гранульований крохмаль, демонстрували значне збільшення вмісту білків. В свою чергу, система з глюкозою із використанням розчинних субстратів, показувала значно вищий вміст полісахаридів.

Високопродуктивне секвенування підтвердило вплив різних характеристик мулу при живленні різними формами крохмалю на функціональну мікробну спільноту. Домінуючим родом у системі з партикулярним крохмалем виявився *Flavobacterium*, що сприяє продукції полісахаридів в екстрацелюлярних полімерних речовинах, тоді як домінуючим родом у системі з розчинним крохмалем був *Kouleoethrix*, який виконує адсорбційно-містковуроль у мулі з більшими розмірами часток та підтримує добру седиментаційну ефективність [16].

Революційним досягненням останніх років стало впровадження методів машинного навчання для

раннього виявлення спухання мулу. У роботі [17] запропоновано новаторську динамічну графову згорткову мережу з механізмом уваги для ефективного виявлення зачаткових проблем, пов'язаних зі спуханням мулу. Модель використовує графові структури для представлення складних взаємозв'язків та темпоральної динаміки часових рядів даних, використовуючи лагові спостереження для створення матриць суміжності, що відображають поведінку системи в часі.

Експериментальні результати продемонстрували, що динамічна графова згорткова мережа перевершує традиційні моделі в управлінні динамічними даними, досягаючи швидкості виявлення 99%, нульової кількості хибних тривог та менше одного відсотка некоректних виявлень [17]. Модель була валідована з використанням Benchmark Simulation Model 2 для симуляції різних сценаріїв спухання мулу, а також даних з реальних очисних споруд.

Альтернативний підхід, запропонований у 2023 році, використовує динамічне графове вбудовування для моніторингу спухання мулу у промислових очисних спорудах [18]. Метод ідентифікує подібності між процесними змінними як у темпоральних, так і в просторових залежностях. Динамічна байєсівська мережа обчислює апіорні та апостеріорні ймовірності, що оновлюються на кожному часовому кроці, дозволяючи діагностувати основні причини спухання з точністю 98%.

Технології високопродуктивного секвенування революціонізували розуміння мікробних спільнот активного мулу. Всебічний огляд 2025 року підкреслює роль флуоресцентної гібридизації *in situ*, полімеразної

ланцюгової реакції та високопродуктивного секвенування у виявленні та ідентифікації нитчастих бактерій [2]. Ці методології надали детальні інсайти у динаміку та взаємодії мікробних спільнот.

Кількісний аналіз зображень, що використовує складну мікроскопію та обчислювальні техніки, став потужним інструментом для дослідження характеристик пластівців та кількісної оцінки нитчастих бактерій, підвищуючи точність виявлення спухання мулу [2]. Інтеграція операційних даних з методами машинного навчання та статистичними методами дозволяє підвищити прогностичну точність, що є критично важливим для раннього виявлення та ефективного управління спуханням.

Розвиток специфічних молекулярних зондів для ідентифікації нитчастих бактерій значно покращив можливості діагностики. Застосування 16S рРНК-орієнтованих олігонуклеотидних зондів для *Haliscomenobacter* spp., *Sphaerotilus* spp., *Leptothrix* spp., *Thiothrix* spp. та інших дозволяє швидкий моніторинг високої роздільності цих організмів [12].

Гібридизація на місці з флуоресцентними похідними зондів у поєднанні з конфокальною лазерною скануючою мікроскопією забезпечує аналіз тривимірної локалізації філаментів всередині мулових пластівців. Це дозволяє не тільки ідентифікувати види нитчастих бактерій, але й розуміти їх просторове розташування та роль у структурі пластівців.

Узагальнену порівняльну характеристику всіх методів діагностики спухання мулу представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів діагностики спухання активного мулу

Метод діагностики	Час виявлення	Точність, %	Вартість впровадження	Складність використання	Переваги	Обмеження
Мікроскопія (традиційна)	2-4 год	60-75	Низька	Середня	Доступність, простота, візуалізація структури	Суб'єктивність оцінки, неможливість кількісного аналізу
Індекс об'єму мулу (ИОМ)	30-60 хв	70-80	Дуже низька	Низька	Швидкість, стандартизація, простота	Запізніле виявлення, не показує причину спухання
Хімічний аналіз ЕІР	4-8 год	75-85	Середня	Висока	Розуміння молекулярних механізмів, кількісні дані	Тривалість аналізу, потреба у обладнанні
FISH (флуоресцентна гібридизація)	3-6 год	85-92	Висока	Висока	Специфічна ідентифікація видів, кількісний аналіз	Вартість зондів, потреба у спеціалістах
Високопродуктивне секвенування (NGS)	24-48 год	92-97	Дуже висока	Дуже висока	Повний профіль мікробіому, ідентифікація 94 видів	Висока вартість, складність інтерпретації даних
qPCR (кількісна ПЛР)	2-4 год	88-95	Середня	Висока	Швидкість, кількісна оцінка конкретних видів	Потреба у праймерах для кожного виду
Машинне навчання (графові нейронні мережі)	Реальний час	99	Висока (початкова)	Середня (після налаштування)	Точність 99%, 0% хибних тривог, раннє виявлення, автоматизація	Потреба у навчальних даних, початкові інвестиції
Примітка: ЕІР – екстрацелюлярні полімерні речовини; FISH – fluorescence in situ hybridization; qPCR – quantitative polymerase chain reaction; NGS – next-generation sequencing.						

Найбільш інноваційним напрямком останніх років став розвиток біологічних методів контролю спухання мулу. Дослідження 2024-2025 років демонструють високий потенціал використання бактеріофагів для специфічного таргетування нитчастих бактерій. Бактеріофаг ННУ здатен специфічно впливати на нитчасту бактерію *Haliscomenobacter hydrossis*, відповідальну за спухання мулу, що призводить до підвищення швидкості осадження та зниження індексу об'єму мулу [2, 3].

Використання коктейлів бактеріофагів для підвищення бактеріальної супресії та задоволення специфічних вимог різних бактеріальних штамів, присутніх у системах очищення стічних вод, є перспективним підходом [3]. Однак найбільшим обмеженням залишається складність підтримання оптимальної мікробної спільноти, яка може функціонувати стабільно за різноманітних умов навколишнього середовища.

Метод *quorum quenching*, що полягає у блокуванні системи комунікації між бактеріями через молекули-сигнали, також показує обнадійливі результати для контролю спухання [2]. Цей підхід дозволяє специфічно впливати на координоване поведіння нитчастих бактерій без застосування неспецифічних біоцидів.

Ефективний метод контролю спухання, викликаного *Thiothrix* species, був продемонстрований у повномасштабному дослідженні на очисних спорудах молочної промисловості. Дослідження свідчать, що модифікація циклу реактора на основі впровадження періодичного голодування ефективно вирішує проблему виносу біомаси та фактично знижує індекс об'єму мулу [4].

Аналіз бактеріального різноманіття з використанням 16S ампліконного секвенування та кількісної полімеразної ланцюгової реакції показав зниження рясності *Thiothrix* з 51,9% до 1,0% в одному реакторі та з 71,8% до 0,6% в іншому. Одночасно відбулося

збільшення рясності глікоген-акумулюючої бактерії *Candidatus Competibacter*. Мікроскопічний аналіз підтвердив трансформацію від спухлого мулу до гранулоподібного мулу з покращеними седиментаційними властивостями [4].

Це дослідження підтверджує застосовність періодичного голодування для вирішення рекурентного спухання, викликаного *Thiothrix*, конверсії пухких агрегатів у щільні компактні гранулоподібні структури та значного зменшення енергетичних потреб на аерацію.

Узагальнені рекомендації щодо вибору методів контролю спухання залежно від типу нитчастих бактерій наведено в таблиці 2.

Таблиця 2
Рекомендовані методи контролю для різних типів нитчастих бактерій

Вид	Основна причина	Рекомендований метод	Обґрунтування
<i>Microthrix parvicella</i>	Низька температура, жири	Періодичне голодування, бактеріофаги	Високий вміст ліпідів робить їх чутливими до голодування
<i>Thiothrix</i> spp.	Сульфіди, низьке DO	Періодичне голодування	Зниження рясності з 71,8% до 0,6% за 14 діб
Тип 0092, 0803 (<i>Chloroflexi</i>)	Низьке F/M	Оптимізація F/M, аерація	Чутливі до змін навантаження
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>	Низький pH	Бактеріофаг ННУ, корекція pH	Специфічне пригнічення фагами

Порівняльну динаміку зміни індексу об'єму мулу при застосуванні різних методів контролю представлено на рисунку 1.

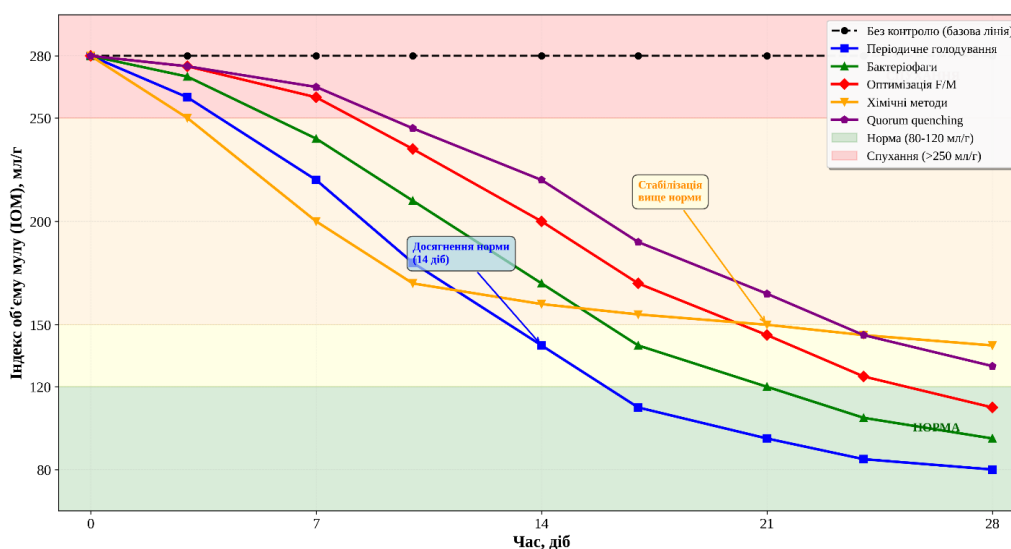


Рис. 1 – Динаміка зміни індексу об'єму мулу при застосуванні різних методів контролю спухання

Аналіз представленої динаміки свідчить, що різні методи контролю демонструють відмінну швидкість досягнення нормативних значень ІОМ. Найшвидший результат забезпечує періодичне голодування (досягнення норми за 14 діб), що узгоджується з експериментальними даними [4]. Біологічні методи (бактеріофаги, quorum quenching) характеризуються помірною швидкістю дії (21-28 діб), однак забезпечують стабільний довготривалий ефект без негативного впливу на функціональні групи мікроорганізмів [2, 3].

Хімічні методи забезпечують швидкий початковий ефект, проте їх застосування обмежене ризиком неповного вирішення проблеми та можливістю повторного спухання. Оптимізація процесних параметрів (F/M, аерація) демонструє поступовий, але стабільний ефект, що робить цей підхід оптимальним для довгострокової профілактики спухання.

Комплексне дослідження 2025 року підкреслює важливість інтегрованих, багатогранних стратегій, що враховують екологічний баланс всередині систем активного мулу для досягнення довгострокового контролю спухання [2]. Оцінка різноманітних стратегій контролю від хімічних до біологічних та фізичних методів підкреслює потенціал таких технологій, як quorum quenching та магнітні поля у вирішенні проблем спухання.

Застосування мультидисциплінарного підходу, що поєднує мікробну екологію, процесне інженірування та технологічні інновації, забезпечує холістичну перспективу на виклики спухання мулу. Важливим є розуміння, що жоден окремий метод не є повністю ефективним, тому необхідна комбінація підходів з урахуванням специфіки конкретних очисних споруд.

Висновки

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень 2023-2025 років засвідчує суттєву трансформацію підходів до розуміння та контролю проблеми виносу активного мулу. Якщо традиційна парадигма фокусувалася виключно на нитчастих бактеріях як причині спухання, то сучасні протеомічні та молекулярні дослідження розкрили складну взаємодію між структурними змінами екстрацелюлярних полімерних речовин, електростатичними властивостями бактеріальних клітин та фізико-хімічними параметрами середовища. Встановлення зв'язку між співвідношенням білків і полісахаридів та седиментаційними властивостями мулу створює теоретичну основу для розробки превентивних стратегій контролю.

Револьюційним досягненням останніх років стала конвергенція біотехнологій, інформаційних технологій та мікробної екології. Інтеграція високопродуктивного секвенування з алгоритмами машинного навчання не лише підвищила точність діагностики до 99%, але й дозволила перейти від реактивного до проактивного управління системами біологічного очищення.

Динамічні графові згорткові мережі демонструють потенціал для створення систем автоматизованого контролю в режимі реального часу, що є критично важливим для великих міських та промислових очисних споруд.

Особливої уваги заслуговує парадигмальний зсув від неспецифічних хімічних методів контролю до таргетованих біологічних підходів. Успішне застосування бактеріофагів та стратегії періодичного голодування підтверджує можливість специфічного впливу на проблемні види нитчастих бактерій зі збереженням функціональної структури мікробної спільноти. Трансформація спухлого мулу у гранулоподібну структуру за 14 діб не лише вирішує проблему седиментації, але й відкриває перспективи для зменшення енергетичних витрат на аерацію та утилізацію надлишкового мулу.

Виявлення кореляції між нитчастими бактеріями та генами антибіотикорезистентності розширює розуміння проблеми спухання мулу за межі операційної ефективності очисних споруд, додаючи важливий епідеміологічний вимір. Це підкреслює необхідність розгляду систем біологічного очищення не лише як технологічної інфраструктури, але й як критичного компонента системи охорони здоров'я, що вимагає комплексного підходу до управління мікробними ризиками.

Перспективи подальших досліджень вбачаються у декількох напрямках. По-перше, необхідна розробка широкого спектру специфічних бактеріофагів для контролю 94 ідентифікованих видів нитчастих бактерій з урахуванням їх екологічних особливостей. По-друге, удосконалення алгоритмів машинного навчання повинно включати не лише прогнозування спухання, але й автоматизовану рекомендацію оптимальних коригувальних дій. По-третє, критично важливим є створення інтегрованих систем управління, що поєднують молекулярну діагностику, процесний контроль та управління ризиками антибіотикорезистентності в єдиній платформі для забезпечення сталої роботи очисних споруд.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні цілісного міждисциплінарного погляду на проблему виносу активного мулу, що інтегрує досягнення молекулярної біології, машинного навчання, екології та епідеміології на основі критичного аналізу найсучасніших досліджень 2023-2025 років.

Практична значущість результатів визначається можливістю безпосереднього впровадження описаних методів діагностики та контролю на очисних спорудах різного масштабу та призначення, що дозволить підвищити надійність біологічного очищення, зменшити операційні витрати та забезпечити стабільну якість очищених стічних вод з одночасним контролем мікробіологічних ризиків.

Перелік використаних джерел

- [1] Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: The old and

- the new / Sam T., Le Roes-Hill M., Hoosain N., Welz P. *Water*. 2022. Vol. 14(20). Article 3223. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14203223>.
- [2] Advancing sludge bulking control in wastewater treatment: A comprehensive review of detection, identification, and strategic interventions / H. Sun et al. *Sustainable Horizons*. 2025. Vol. 15. Article 100142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100142>.
- [3] Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater / Chen Y., Jiang X., Yang M., Wang Z. *Frontiers in Microbiology*. 2025. Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1603215>.
- [4] Filamentous bacteria-induced sludge bulking can alter antibiotic resistance gene profiles and increase potential risks in wastewater treatment systems / Ma Y., Qiao Y., Zhang X., Ye L. *Environment International*. 2024. Vol. 190. Article 108920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108920>.
- [5] New insights into filamentous sludge bulking: The potential role of extracellular polymeric substances in sludge bulking in the activated sludge process / W. M. Li et al. *Chemosphere*. 2020. Vol. 248. Article 126012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126012>.
- [6] The mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of activated sludge flocs / Q. An et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 663. Article 131009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131009>.
- [7] Population Composition, Physiology and Ecology of Filamentous Bacteria in Activated Sludge / S. Gao et al. *Processes*. 2024. Vol. 12(10). Article 2156. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12102156>.
- [8] Filamentous bacteria in activated sludge: Geographic distribution and impact of treatment processes / R. Liu et al. *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 379. Article 124859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124859>.
- [9] Alterations in microbial communities and antibiotic resistance genes pre- and post-sludge bulking in a wastewater treatment plant / L. Zhang et al. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 376. Article 126391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126391>.
- [10] Prediction of activated sludge sedimentation performance using deep transfer learning / J. Wang et al. *ACS ES&T Engineering*. 2024. Vol. 4(6). Pp. 1367-1377. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00631>.
- [11] A hybrid extreme learning machine and deep belief network framework for sludge bulking monitoring in a dynamic wastewater treatment process / Usman S., Jorge L., Hai-Tra N., Yoo C. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 46. Article 102580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102580>.
- [12] GenomeFISH: genome-based fluorescence in situ hybridization for strain-level visualization of microbial communities / J. P. Engelberts et al. *The ISME Journal*. 2025. Vol. 19(1). Article wraf138. DOI: <https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf138>.
- [13] Insight into sludge bulking in a full-scale wastewater treatment plant: Quorum sensing, microbial community, and metabolic characteristics / L. Liu et al. *Environmental Technology and Innovation*. 2024. Vol. 34. Article 103562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103562>.
- [14] Non-filamentous sludge bulking induced by exopolysaccharide variation in structure and properties during aerobic granulation / S. Wang et al. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 876. Article 162786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162786>.
- [15] Poelmans S., Dobbeleers T., Dries J. Bacterial community and filamentous population of industrial wastewater treatment plants in Belgium. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2024. Vol. 108. Pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12822-8>.
- [16] Pathways of inhibition of filamentous sludge bulking by slowly biodegradable organic compounds / C. Gao et al. *Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 150. Pp. 104-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.021>.
- [17] Towards sludge bulking diagnosis via dynamic attention graph neural network / Y. Chen et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 69. Article 106774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106774>.
- [18] Sludge bulking monitoring in industrial wastewater treatment plants through graphical methods: A dynamic graph embedding and Bayesian networks approach / J. Loy-Benitez et al. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 345. Article 118804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118804>.

DIAGNOSIS AND CONTROL OF ACTIVATED SLUDGE BULKING AT BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Kopanytsia O.B.

leading forensic expert of the Laboratory of environmental and ecological research of the Kyiv Research institute of forensic expertise of the Ministry of justice of Ukraine; postgraduate student, State scientific institution «Institute of ecological restoration and development of Ukraine», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>, e-mail: ecology.expert.2020@gmail.com

The article examines the problem of activated sludge carryover from secondary clarifiers of biological wastewater treatment plants based on the most recent research from 2023-2025. The relevance of the study is determined by the fact that sludge bulking not only deteriorates the quality of treated effluent but also increases the risks of antibiotic resistance gene dissemination. The aim of the work is a comprehensive analysis of the problem with emphasis on innovative diagnostic and control methods. The study is based on systematization of scientific publications devoted to molecular mechanisms of sludge bulking, diagnostic technologies, and control strategies. The role of extracellular polymeric substances and filamentous bacteria was analyzed using proteomic methods and high-throughput sequencing. The application of machine learning methods for early bulking detection and biological control methods was examined. It was established that changes in the composition of extracellular polymeric substances lead to electrostatic repulsion between bacterial cells. Ninety-four species of filamentous bacteria were identified, over 74% of which contain antibiotic resistance genes. It was demonstrated that dynamic graph convolutional networks enable achieving 99% bulking detection accuracy with zero false alarms. The periodic starvation method ensures reduction of *Thiothrix* abundance from over 50% to less than 1% within 14 days. Biological methods using bacteriophages allow specific targeting of problematic species without negative impact on functional groups of microorganisms. The scientific novelty lies in systematization of the most recent advances in understanding molecular mechanisms of bulking and innovative approaches to its diagnosis and control. The practical significance of the results lies in the possibility of implementing the described methods at actual treatment plants to enhance the reliability of biological treatment systems. Further research should be directed toward development of specific biological agents, improvement of machine learning algorithms, and creation of integrated management systems.

Keywords: activated sludge, sludge bulking, biomass carryover, filamentous bacteria, high-throughput sequencing, machine learning, diagnostics, biological control.

References

- [1] T. Sam, M. Le Roes-Hill, N. Hoosain, and P. Welz, "Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: The old and the new," *Water*, vol. 14(20), article 3223, 2022. doi: [10.3390/w14203223](#).
- [2] H. Sun et al., "Advancing sludge bulking control in wastewater treatment: A comprehensive review of detection, identification, and strategic interventions," *Sustainable Horizons*, vol. 15, article 100142, 2025. doi: [10.1016/j.horiz.2025.100142](#).
- [3] Y. Chen, X. Jiang, M. Yang, and Z. Wang, "Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater," *Frontiers in Microbiology*, vol. 16, 2025. doi: [10.3389/fmicb.2025.1603215](#).
- [4] Y. Ma, Y. Qiao, X. Zhang, and L. Ye, "Filamentous bacteria-induced sludge bulking can alter antibiotic resistance gene profiles and increase potential risks in wastewater treatment systems," *Environment International*, vol. 190, article 108920, 2024. doi: [10.1016/j.envint.2024.108920](#).
- [5] W.M. Li et al., "New insights into filamentous sludge bulking: The potential role of extracellular polymeric substances in sludge bulking in the activated sludge process," *Chemosphere*, vol. 248, article 126012, 2020. doi: [10.1016/j.chemosphere.2020.126012](#).
- [6] Q. An, Y. Chen, M. Tang, B. Zhao, S. Deng, and Z. Li, "The mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of activated sludge flocs," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 663, article 131009, 2023. doi: [10.1016/j.colsurfa.2023.131009](#).
- [7] S. Gao, W. Pan, L. Niu, H. Lu, and X. Wang, "Population Composition, Physiology and Ecology of Filamentous Bacteria in Activated Sludge," *Processes*, vol. 12(10), article 2156, 2024. doi: [10.3390/pr12102156](#).
- [8] R. Liu et al., "Filamentous bacteria in activated sludge: Geographic distribution and impact of treatment processes," *Journal of Environmental Management*, vol. 379, article 124859, 2025. doi: [10.1016/j.jenvman.2025.124859](#).
- [9] L. Zhang, S. Wang, Y. Jia, Z. Liu, J. Yao, and Y. Chen, "Alterations in microbial communities and antibiotic resistance genes pre- and post-sludge bulking in a wastewater treatment plant," *Environmental Pollution*, vol. 376, article 126391, 2025. doi: [10.1016/j.envpol.2025.126391](#).
- [10] J. Wang, et al., "Prediction of activated sludge sedimentation performance using deep transfer learning," *ACS ES&T Engineering*, vol. 4(6), pp. 1367-1377, 2024. doi: [10.1021/acsestengg.3c00631](#).
- [11] S. Usman, L. Jorge, N. Hai-Tra, and C. Yoo, "A hybrid extreme learning machine and deep belief network framework for sludge bulking monitoring in a dynamic wastewater treatment process," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 46, article 102580, 2022. doi: [10.1016/j.jwpe.2022.102580](#).
- [12] J. P. Engelberts, et al., "GenomeFISH: genome-based fluorescence in situ hybridization for strain-level visualization of microbial communities," *The ISME Journal*, vol. 19(1), article wraf138, 2025. doi: [10.1093/ismejo/wraf138](#).
- [13] L. Liu, Y. Wang, H. Chen, X. Zhang, Q. Guo, and M. Li, "Insight into sludge bulking in a full-scale wastewater treatment plant: Quorum sensing, microbial community, and metabolic characteristics," *Environmental Technology and Innovation*, vol. 34, article 103562, 2024. doi: [10.1016/j.eti.2024.103562](#).
- [14] S. Wang, G. Wang, P. Yan, Y. Chen, F. Fang, and J. Guo, "Non-filamentous sludge bulking induced by

- exopolysaccharide variation in structure and properties during aerobic granulation,” *Science of The Total Environment*, vol. 876, article 162786, 2023. doi: **10.1016/j.scitotenv.2023.162786**.
- [15] S. Poelmans, T. Dobbeleers, and J. Dries, “Bacterial community and filamentous population of industrial wastewater treatment plants in Belgium,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 108, pp. 1-16, 2024. doi: **10.1007/s00253-023-12822-8**.
- [16] C. Gao, F. Yang, Z. Tian, D. Sun, W. Liu, and Y. Peng, “Pathways of inhibition of filamentous sludge bulking by slowly biodegradable organic compounds,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 150, pp. 104-115, 2025. doi: **10.1016/j.jes.2024.03.021**.
- [17] Y. Chen et al., “Towards sludge bulking diagnosis via dynamic attention graph neural network,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 69, article 106774, 2025. doi: **10.1016/j.jwpe.2024.106774**.
- [18] J. Loy-Benitez, S. Tariq, H. Nguyen, S. Heo, and C. Yoo, “Sludge bulking monitoring in industrial wastewater treatment plants through graphical methods: A dynamic graph embedding and Bayesian networks approach,” *Journal of Environmental Management*, vol. 345, article 118804, 2023. doi: **10.1016/j.jenvman.2023.118804**.

Стаття надійшла 10.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Копаниця О. Б. Діагностика та контроль спухання активного мулу на біологічних очисних спорудах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351070>.

ЗАКОНОМІРНОСТІ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Покшевніцька
Т.В.аспірантка, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID:
<https://orcid.org/0009-0008-6606-5073>, e-mail: officentn@gmail.com

Гідротехнічні споруди є критичною інфраструктурою глобального управління водними ресурсами, проте їх експлуатація супроводжується значними екологічними наслідками, що набувають особливої актуальності в контексті зміни клімату та інтенсифікації антропогенного навантаження. Метою роботи є комплексний аналіз закономірностей антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами на основі узагальнення результатів наукових публікацій 2023-2025 років. Дослідження охоплює механізми акумуляції забруднювачів у водосховищах, масштаби седиментації та втрати накопичувальної здатності, закономірності забруднення важкими металами, вплив термічної стратифікації на якість води та сучасні стратегії мінімізації негативного впливу. Методологічною основою роботи є систематичний огляд та критичний аналіз сучасних наукових досліджень. Особлива увага приділяється регіональним відмінностям у масштабах впливу та кореляційним залежностям між характеристиками водосховищ і рівнями забруднення. Виявлено ключові закономірності антропогенного забруднення: прогресуючу седиментацію з регіональною варіативністю, що призведе до втрати 25-26% глобальної накопичувальної здатності водосховищ до 2050 року; двосторонній седиментаційний ефект з акумуляцією наносів у верхів'ї та деградацією екосистем нижче за течією; трифазну модель забруднення важкими металами з послідовною зміною стадій низького, швидкого забруднення та його контролю; парадоксальний розподіл забруднювачів із зменшенням концентрацій у водній товщі при зростанні вмісту в донних відкладах; вікову та урбанізаційну залежність накопичення важких металів; термічно-геохімічний зв'язок, що посилює евтрофікацію через внутрішню ремобілізацію фосфору та створення гіпоксичних умов. Встановлено, що концентрації кадмію можуть перевищувати фонові значення у 6-7 разів, а старіші водосховища демонструють втрату накопичувальної здатності до 50%. Наукова новизна роботи полягає у систематизації та узагальненні найсучасніших досліджень 2023-2025 років, що інтегрує знання про седиментацію, забруднення важкими металами, термічну стратифікацію та екологічні наслідки у єдиний міждисциплінарний фреймворк розуміння антропогенного впливу гідротехнічних споруд. Практична значущість дослідження полягає в обґрунтуванні необхідності впровадження комплексних стратегій управління водосховищами, що включають екологічні попуски води, технології штучної дестратифікації та програми управління седиментами для мінімізації довгострокових екологічних ризиків. Результати роботи можуть бути використані при розробці національних стратегій управління водними ресурсами, плануванні екологічного моніторингу водосховищ та оцінці екологічних наслідків будівництва нових гідротехнічних споруд. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку прогностичних моделей акумуляції забруднювачів з урахуванням кліматичних змін та створення адаптивних систем управління якістю води у водосховищах в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Ключові слова: гідротехнічні споруди, водосховища, антропогенне забруднення, важкі метали, седиментація, якість води, екологічні ризики.

Постановка проблеми

Гідротехнічні споруди відіграють критичну роль у глобальному управлінні водними ресурсами, забезпечуючи потреби у питній воді, зрошенні, виробництві електроенергії та контролі паводків. Станом на 2024 рік у світі налічується понад 58 000 великих гребель, які регулюють стік основних річкових басейнів планети. Однак експлуатація гідротехнічної інфраструктури супроводжується значними екологічними наслідками, що стають предметом інтенсивних наукових досліджень останніх років.

Згідно з дослідженням 2024 року, водосховища генерують понад 103 мільйони тонн надлишкового седименту щороку, що призводить до втрати накопичувальної здатності та зміни якості водних ресурсів [1]. Проблема антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами набуває особливої актуальності в контексті зміни клімату, урбанізації та інтенсифікації промислового виробництва.

Дослідження 2023-2025 років продемонстрували складні взаємозв'язки між функціонуванням гідротехнічних споруд та забрудненням водних ресурсів. Зокрема, виявлено, що будівництво гребель змінює гідрогеохімічну поведінку важких металів, посилює евтрофікацію водойм та порушує природні процеси самоочищення річкових систем [2, 3].

Особливу увагу сучасні дослідження приділяють взаємозв'язкам між зміною клімату та функціонуванням гідроенергетичної інфраструктури. Дослідження 2024 року показало, що посухи можуть погіршувати якість повітря в регіонах, які залежать від гідроенергетики, шляхом зміщення виробництва енергії на електростанції спалювання, що призводить до збільшення концентрації PM_{2,5} в середньому на 0,83 мкг/м³ та до 10 000 передчасних смертей щороку [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Наукові дослідження екологічних наслідків будівництва гідротехнічних споруд пройшли значну

еволюцію від початкового фокусу на технічних та економічних аспектах до комплексного розуміння екосистемних впливів. У перші десятиліття масового гідротехнічного будівництва (1930-1960-ті роки) переважали інженерно-технічні підходи. Перелом відбувся у 1970-1980-х роках з розвитком екологічної гідрології та усвідомленням масштабних наслідків фрагментації річкових систем. Сучасний етап (2000-ті роки - сьогодні) характеризується міждисциплінарним підходом та використанням передових методів моніторингу.

Дослідження останніх років свідчать, що греблі впливають на екосистеми через зниження річкового стоку, зменшення потоку седиментів, зміну температури води, трансформацію естуаріїв та фрагментацію середовищ проживання. Їх будівництво змінює гідрогеоморфологічні умови та зменшує латеральну зв'язність річок, що призводить до зниження продуктивності заплавлених та водно-болотних екосистем. Водночас, видалення малих гребель може призвести до відновлення річкових екосистем протягом трьох років [5, 6, 7].

Седиментація водосховищ стала предметом глобальних оцінок і перше планетарне оцінювання охопило аналіз 47 403 великих гребель у 150 країнах за результатом якого було спрогнозовано втрату 26% глобальної накопичувальної здатності до 2050 року. Аналіз змін накопичувальної здатності 256 водосховищ у США виявив, що седиментація є одним з ключових факторів зниження водозапасаєв років [8, 9].

У 2023 виявлено характерну модель забруднення важкими металами у малих та середніх водосховищах з трьома чіткими стадіями: низьке забруднення, швидке забруднення та контроль забруднення [10]. Комплексний огляд ризиків важких металів у водосховищах показав необхідність передових технологій моніторингу та екологічно чистих стратегій ремедіації [11].

Термічна стратифікація та її вплив на якість води досліджувалася у різних кліматичних зонах. Встановлено, що індекс міцності термокліну має високу кореляцію з індексом хімічної стратифікації, що підкреслює придатність цього показника для характеристики хімічної стабільності стратифікації водосховищ [12]. Глобальний огляд систем штучної дестратифікації у 138 системах та у 114 водосховищах засвідчив, що бульбашкові плюми є більш ефективними, ніж механічне змішування [13].

Аналіз літератури виявляє, що попри значний прогрес у розумінні окремих аспектів впливу гідротехнічних споруд, залишається потреба у комплексному систематизованому огляді найсучасніших досліджень 2023-2025 років, що інтегрує знання про седиментацію, забруднення важкими металами, термічну стратифікацію та екологічні наслідки для водних екосистем.

Мета статті

Дослідження спрямовано на комплексне узагальнення сучасних тенденцій антропогенного

забруднення водних екосистем, пов'язаних із функціонуванням гідротехнічних споруд, з урахуванням наукових даних 2023-2025 рр. Особливу увагу приділено процесам акумуляції забруднювачів у водосховищах, інтенсивності седиментації та втратам ємності водойм, поширенню важких металів, впливу термічної стратифікації на якість води й ефективності сучасних методів мінімізації екологічних ризиків.

Виклад основного матеріалу

Седиментація водосховищ є однією з найбільш значущих проблем сучасної гідротехнічної інфраструктури. Дослідження ООН 2023 року, що охопило понад 47 000 великих гребель у 150 країнах, виявило, що до 2050 року світові водосховища втратять понад 25% своєї накопичувальної здатності через акумуляцію донних відкладів. Значними виявились регіональні відмінності у масштабах седиментації. Так, Азіатсько-Тихоокеанський регіон, найбільш «загреблена» територія світу, очікує втрат близько 23% до середини століття, що становить нижчий показник порівняно з іншими регіонами. Найбільші втрати прогнозуються для Японії, де середній вік гребель становить 100 років – країна вже втратила 39% накопичувальної здатності водосховищ, і цей показник досягне 50% до 2050 року. Після Японії, Азербайджан (24%), Ізраїль (24%) та Афганістан (20%) демонструють найвищі очікувані втрати. Проблема седиментації набуває особливої гостроти в Азії, де проживає 60% світового населення, оскільки водні запаси необхідні для забезпечення продовольчої та водної безпеки регіону. Втрата 23% накопичувальної здатності водосховищ становить значну загрозу для стійкості водних ресурсів. У контексті зміни клімату, що приносить триваліші посухи та інтенсивніші опади, максимізація можливостей зберігання води стає однією з основних проблем [14].

Греблі блокують природний рух наносів у річках, створюючи дві протилежні проблеми по обидва боки від гідротехнічної споруди. Нижче за течією від греблі природне джерело седиментів відсікається, що призводить до «голодування» річки та деградації прибережних екосистем, які потребують мулу та піску для підтримання природних місць проживання. Вище за течією седименти поступово накопичуються, оскільки не можуть ефективно проходити через греблю. Акумуляція седиментів створює множинні проблеми: вона займає простір, призначений для зберігання води; накопичується навколо гідроенергетичних установок, перешкоджаючи їх роботі; додає навантаження на греблю; робить водосховище меншим за глибиною, зменшуючи рекреаційний доступ [15]. Особливо показовим є приклад водосховища Конавінго на річці Саскуеханна (США), яке досягло 92% наповнення седиментами та втратило здатність до довгострокового затримання наносів і пов'язаних з ними поживних речовин. Згідно з дослідженням 2024 року, водосховище Конавінго затримувало в середньому 3,5 мільйони фунтів фосфору та чотири мільярди

фунтів седиментів щороку з моменту відкриття в 1928 році, що становило приблизно третину фосфору та половину седиментів, які надходять річкою до Чесапікської затоки. Однак після досягнення 92% заповнення у 2015 році, водосховище затримує менші обсяги седиментів, а під час великих штормів мул та пов'язані поживні речовини виносяться через греблю у затоку із значно більшою частотою [16].

Найбільш значущою проблемою седиментації є втрата накопичувальної здатності для водопостачання чи контролю паводків. У контексті зміни клімату, що приносить триваліші посухи та більші шторми, максимізація можливостей зберігання води стає ще більш критичною та додається до переліку проблем водного розвитку, з якими світ вже стикається та не в змозі вирішити [14].

Будівництво гребель істотно впливає на геохімічну поведінку важких металів у річкових системах. Дослідження водосховища «Три ущелини» у Китаї протягом 2008-2020 років продемонструвало, що рівні важких металів (окрім Cr) значно перевищували фонові значення ґрунтів, причому Cu, Zn, As, Cd, Pb та Hg відповідали помірно та високо забрудненим класам. Концентрації кадмію виявились у 6-7 разів вищими за фонові значення ґрунтів. Після повного наповнення водосховища у 2008-2014 роках спостерігалось очевидне збільшення більшості важких металів (окрім Ni та As), що підтверджує роль будівництва водосховища у посиленні ефектів сорбції седиментами важких металів. Просторові закономірності розподілу металів значною мірою залежали від точок відбору проб, що свідчить про те, що інтенсивна антропогенна діяльність є основним джерелом забруднення. Рівні більшості

важких металів (окрім Cd та Hg) перевищували порогову концентрацію ефекту (ТЕС), що вказує на ризики негативних впливів, тоді як всі важкі метали були нижчими за ймовірну концентрацію ефекту (РЕС) [2]. Дослідження 2022 року виявило парадоксальний ефект будівництва гребель на якість води: концентрації важких металів у основному руслі води водосховища «Три ущелини» зменшилися після затоплення, тоді як їх концентрації та забруднення в седиментах зони коливання рівня води значно зросли, особливо для металів антропогенного походження, таких як кадмій, свинець та цинк [17].

Дослідження польських водосховищ 2023 року підтверджує глобальний характер проблеми. Середні концентрації важких металів у донних відкладах 28 водосховищ становили: Cd < Ni < Cr < Cu < Pb < Zn (0,187; 7,30; 7,74; 10,62; 12,47 та 52,67 мг/дм³ відповідно). Індекс навантаження забруднення варіював від 0,05 до 2,45, вказуючи на забруднення донних відкладів у семи водосховищах. Аналіз показав, що концентрації Pb, Zn та Cd є вищими у старіших водосховищах та тих, які мають більшу частку штучних територій у їх водозборах [18].

Дослідження італійських водосховищ Камастра та Сан-Джуліано у 2024 року виявило, що хоча седименти не характеризуються значним забрудненням важкими металами (більшість показників індексів коливалися між 0 та 1 – «незабруднені»), у деяких випадках значення були між 1 та 2 («слабко забруднені») [19].

Узагальнення результатів досліджень різних водосховищ світу дозволяє виявити характерну трифазну модель динаміки забруднення донних відкладів важкими металами (рис. 1).

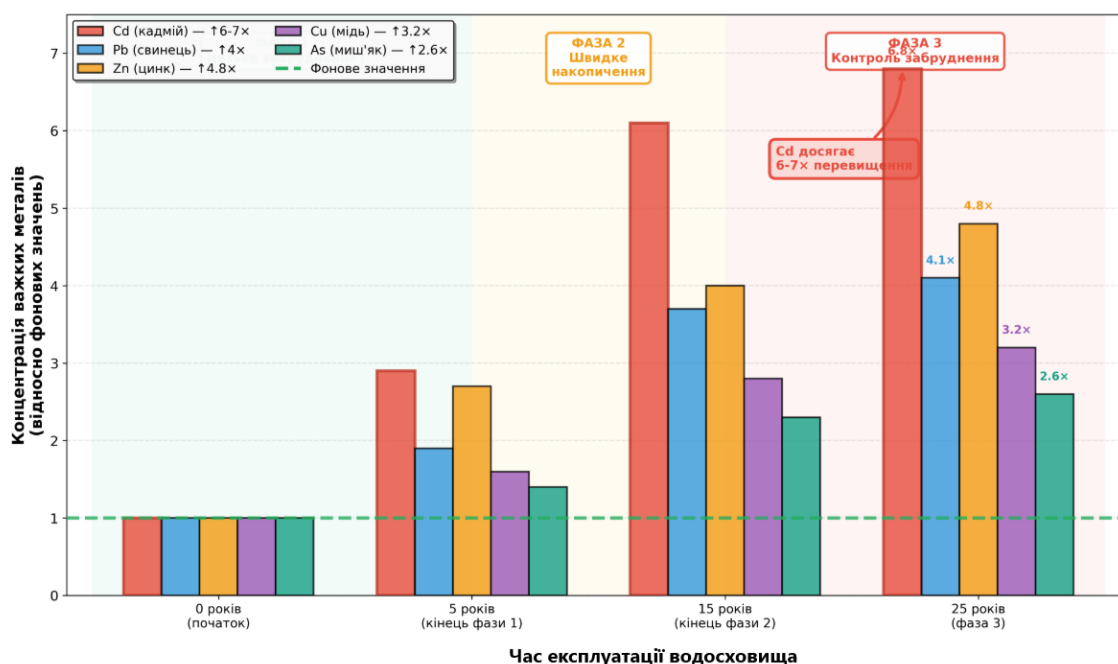


Рис. 1 – Трифазна модель динаміки забруднення донних відкладів водосховищ важкими металами

Перша фаза (0-5 років експлуатації) характеризується низьким рівнем забруднення, коли концентрації важких металів наближаються до фонових значень. Друга фаза (5-15 років) демонструє швидке накопичення металів у донних відкладах, при цьому найбільш інтенсивно акумулюються метали антропогенного походження, зокрема кадмій, концентрація якого може зростати у 6-7 разів відносно фонових значень. Третя фаза (15+ років) характеризується уповільненням темпів накопичення та стабілізацією концентрацій на рівні контролю забруднення (рис. 1).

Особливу увагу привертає катастрофічний випадок руйнування дамби Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року, яке експонувало до 1,7 км³ забруднених седиментів. Дослідники оцінюють, що ці седименти містять до 83 300 тонн високотоксичних важких металів, які описуються як «токсична бомба уповільненої дії». Станом на 2024 рік, менше 1% забруднення було вивільнено в прилеглі території, переважно з верхів'я греблі, однак поверхневий стік під час дощів та сезонні паводки продовжують мобілізувати забруднювачі [20].

Дослідження, присвячене 54 найбільшим низькоширотним водосховищам, виявило, що два фундаментальні фізичні процеси визначають більшість змін якості води: затримування седиментів та поживних речовин, а також термічна стратифікація у водосховищах. Глибина, на яку відбувається перемішування (часто 50 м і більше) під час дестратифікації, є продуктом м'якого градієнта термічної густини між поверхневою та глибокою водою, що забезпечує більше можливостей для транспортування глибокого фосфору назад на поверхню. Термічно стратифіковані низькоширотні водосховища мають високий ризик виникнення проблем евтрофікації через внутрішню ремобілізацію фосфору. Іншим екологічним стресором, який накладається гіпоксичною водою водосховища, є висока концентрація відновлених сполук, таких як сірководень (H₂S) та відновлене залізо, які обмежують біологічну доступність поживних речовин та створюють токсичні умови для водної біоти [21].

Найбільш розроблений та впроваджений підхід (або сукупність підходів) для пом'якшення впливів гребель – це екологічні попуски (eflows), які прагнуть коригувати скиди з дамб для імітації природних гідрологічних патернів. Хоча підхід екологічних попусків традиційно зосереджувався на пом'якшенні екологічних проблем, що впливають з порушених гідрологічних режимів, зростає усвідомлення того, що якість води (змінні, такі як температура води, забруднювачі, поживні речовини, органічна речовина, седименти, розчинений кисень) повинна бути інкорпорована у фреймворк.

Дослідження 2024 року підкреслює зростаючу проблему азотного забруднення водних ресурсів. Прогнозується, що до 2050 року загальні надходження розчиненого азоту (TDN) до річок становитимуть 112-147 кілотонн/рік серед трьох сценаріїв, що відповідає

збільшенню на 6-39% порівняно з 2010 роком. У найгіршому сценарії (SSP5-RCP8.5) це збільшення можна пояснити зростанням антропогенних джерел, таких як побутові відходи та синтетичні добрива. У цьому сценарії прогнозується, що стічні води стануть домінуючим джерелом азотного забруднення річок, в основному через діяльність, пов'язану з швидкою урбанізацією, та недостатні технології очищення стічних вод та інфраструктуру. Дослідження виявило, що азотне забруднення посилює дефіцит води у понад 2000 суббасейнах, таким чином більше 3 мільярди людей зіткнуться з серйозним дефіцитом води вже у 2050 році [22].

Дослідження останніх років показало, що з 1950-х років антропогенна діяльність (надмірний вилов риби, забруднення води, будівництво гідротехнічних споруд, судноплавство та розвиток берегової лінії, інвазивні чужорідні види тощо) значною мірою змінюють гідрологічні та екологічні умови річок, що призводить до різкої втрати біорізноманіття. Блокування річкових та озерних водних систем створює негативний каскадний ефект на екосистеми [2].

Найбільш розроблений підхід для мінімізації впливів гребель – це екологічні попуски води (environmental flows), які прагнуть коригувати скиди з дамб для імітації природних гідрологічних патернів. Підхід екологічних попусків до управління водосховищем може впроваджувати симульований паводковий період шляхом вивільнення деяких запасів води водосховища протягом відповідного сезону. Хоча підхід екологічних попусків традиційно зосереджувався на пом'якшенні екологічних проблем, що впливають з порушених гідрологічних режимів, зростає усвідомлення того, що якість води (змінні, такі як температура води, забруднювачі, поживні речовини, органічна речовина, седименти, розчинений кисень) повинна бути інкорпорована у фреймворк [21].

На основі аналізу сучасних наукових публікацій 2023-2025 років виявлено наступні ключові закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами:

1. Прогресуюча седиментація з регіональною варіативністю: глобальні водосховища демонструють втрату накопичувальної здатності зі швидкістю, що призведе до скорочення на 25-26% до 2050 року, при цьому найбільші втрати спостерігаються у регіонах з тривалим терміном експлуатації гідротехнічних споруд (Японія – 39-50%, Азербайджан та Ізраїль – по 24%).

2. Двосторонній седиментаційний ефект: греблі створюють протилежні проблеми по обидва боки споруди – акумуляцію седиментів у верхів'ї водосховища (що призводить до втрати накопичувальної здатності) та «голодування» річки нижче за течією (деградація прибережних екосистем через відсікання природного джерела наносів).

3. Часова динаміка забруднення важкими металами: у малих та середніх водосховищах виявлено

характерну трифазну модель – низьке забруднення (початкова стадія), швидке забруднення (період активного накопичення) та контроль забруднення (стабілізація). Концентрації важких металів у седиментах систематично зростають після повного наповнення водосховищ, особливо для металів антропогенного походження (Cd, Pb, Zn).

4. Парадоксальний розподіл забруднювачів: будівництво гребель призводить до зменшення концентрацій важких металів у водній товщі при одночасному значному зростанні їх вмісту в донних відкладах, особливо в зоні коливання рівня води, що створює латентні екологічні ризики.

5. Вікова та урбанізаційна залежність: концентрації важких металів (Pb, Zn, Cd) у донних відкладах корелюють з віком водосховища та часткою штучних територій у водозборі, що підтверджує кумулятивний характер антропогенного навантаження.

6. Термічно-геохімічний зв'язок: у низькоширотних водосховищах термічна стратифікація посилює евтрофікацію через внутрішню ремобілізацію фосфору та створення гіпоксичних умов з високими концентраціями токсичних відновлених сполук (H_2S , Fe^{2+}), що обмежує біологічну доступність поживних речовин.

7. Прогресуюче азотне забруднення: прогнозується зростання надходження розчиненого азоту до річок на 6-39% до 2050 року, при цьому стічні води стануть домінуючим джерелом забруднення через урбанізацію та недостатність технологій очищення.

Виявлені закономірності підтверджують системний характер антропогенного впливу гідротехнічних споруд на водні ресурси та вказують на необхідність впровадження комплексних стратегій управління, що інтегрують екологічні попуски води, технології штучної дестратифікації та програми управління седиментами для мінімізації довгострокових екологічних ризиків.

Висновки

Аналіз наукових публікацій 2023-2025 років виявив критичні закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами, що проявляються у трьох взаємопов'язаних процесах: прогресуючій седиментації з втратою чверті глобальної накопичувальної здатності водосховищ до 2050 року, трифазній динаміці накопичення важких металів з перевищенням фонових концентрацій у 6-7 разів, та термічній стратифікації, що посилює евтрофікацію і створює гіпоксичні умови.

Встановлено, що масштаби забруднення визначаються віком водосховища, рівнем урбанізації водозбору та особливостями термогідродинамічного режиму. Виявлений парадоксальний ефект розподілу забруднювачів – зменшення концентрацій у воді при зростанні вмісту в донних відкладах – створює довгострокові екологічні ризики для водних екосистем.

Результати дослідження обґрунтовують необхідність переходу від традиційних підходів до комплексного управління водосховищами, що інтегрує екологічні попуски води, штучну дестратифікацію та контроль седиментації. Практичне застосування виявлених закономірностей дозволить підвищити ефективність екологічного моніторингу та мінімізувати негативний вплив гідротехнічних споруд на якість водних ресурсів.

Перелік використаних джерел

- [1] Ndayiragije J. M., Nkunuzimana A. Socio-environmental impacts of hydropower construction in Burundi. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 21. Article e39084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40084>.
- [2] Progress and future of China's aquatic ecological environment protection / J. Wang et al. *River*. 2024. Vol. 1, no. 2. Pp. 87-102. DOI: <https://doi.org/10.1002/rvr.2.87>.
- [3] Xu Q., Zhou K., Wu B. Dam construction reshapes heavy metal pollution in soil/sediment in the three gorges reservoir, China, from 2008 to 2020. *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. Article 1269138. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1269138>.
- [4] Eriksson M., del Valle A., de la Fuente A. Droughts worsen air quality and health by shifting power generation. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. Article 60090-z. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60090-z>.
- [5] Review of Effects of Dam Construction on the Ecosystems of River Estuary and Nearby Marine Areas / X. Zhang et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 10. Article 5974. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105974>.
- [6] River Damming Impacts on Fish Habitat and Associated Conservation Measures / Q. Chen et al. *Reviews of Geophysics*. 2023. Vol. 61. Article e2023RG000819. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023RG000819>.
- [7] Aquatic habitat response to small dam removal demonstrates recovery in three years / J. Dietrich et al. *Ecosphere*. 2025. Vol. 16. Article e70323. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.70323>.
- [8] Perera D., Williams S., Smakhtin V. Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment». *Sustainability*. 2022. Vol. 15, no. 1. Article 219. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010219>.
- [9] Chen Y., Cai X. The Storage and Operation Changes of 256 Reservoirs Across the Contiguous United States. *Water Resources Research*. 2025. Vol. 61. Article e2024WR037372. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024WR037372>.
- [10] Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China / H. Bing et al. *Environmental Pollution*. 2016.

- Vol. 214. Pp. 485-496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.062>.
- [11] Heavy metals in reservoirs: pollution characteristics, remediation technologies, and future prospects / S. Cui et al. *Agricultural Ecology and Environment*. 2025. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.48130/ae-0025-0003>.
- [12] A case study of thermal and chemical stratification in a drinking water reservoir / Shi J., Wang L., Yang Y., Huang T. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 848. Article 157787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157787>.
- [13] Artificial destratification options for reservoir management / F. Chaaya et al. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 967. Article 178738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178738>.
- [14] Doyle E. The World's Dams Are Filling Up – But Not With Water. 2023. URL: <https://therevelator.org/dams-sedimentation-study/> (дата звернення: 15.10.2024).
- [15] A dwindling water supply caused by reservoir sedimentation troubles engineers. American Society of Civil Engineers. 2024. URL: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/03/a-dwindling-water-supply-caused-by-reservoir-sedimentation-troubles-engineers> (дата звернення: 25.11.2024).
- [16] Conowingo Dam. Chesapeake Bay Program. Chesapeake Bay Foundation. 2024. URL: <https://www.chesapeakebay.net/issues/threats-to-the-bay/conowingo-dam> (дата звернення: 25.11.2024).
- [17] Dam construction attenuates trace metal contamination in water through increased sedimentation in the Three Gorges Reservoir / H. Bing et al. *Water Research*. 2022. Vol. 217. Article 118417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118417>.
- [18] Ecological and Health Risk Assessments of Heavy Metals Contained in Sediments of Polish Dam Reservoirs / Sojka M., Ptak M., Jaskuła J., Krasniqi V. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, no. 1. Article 324. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20010324>.
- [19] A Relevant Characterization and Compatibility for Reuse the Sediments from Reservoirs in Southern Italy / A. M. N. Martellotta et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 2. Article 727. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14020727>.
- [20] Kakhovka dam attack exposed 'toxic time bomb' of heavy metal pollution. Chemistry World. 2024. URL: <https://www.chemistryworld.com/news/kakhovka-dam-attack-exposed-toxic-time-bomb-of-heavy-metal-pollution/4021155.article> (дата звернення: 12.11.2024).
- [21] Enhancing water security through integrated decision-making and selective withdrawal for sustainable reservoir management / F. Alizadeh et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 32214. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18027-5>.
- [22] A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution / M. Wang et al. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Article 880. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>.

REGULARITIES OF ANTHROPOGENIC POLLUTION OF WATER RESOURCES

Pokshevnytska T.V. PhD student, National transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6606-5073>, e-mail: officentn@gmail.com

Hydrotechnical structures are critical infrastructure for global water resources management, yet their operation is accompanied by significant environmental consequences that become particularly relevant in the context of climate change and intensification of anthropogenic pressure. The aim of this work is a comprehensive analysis of patterns of anthropogenic pollution of water resources by hydrotechnical structures based on the synthesis of scientific publications from 2023-2025. The study covers mechanisms of pollutant accumulation in reservoirs, scales of sedimentation and loss of storage capacity, patterns of heavy metal pollution, the impact of thermal stratification on water quality, and modern strategies for minimizing negative impacts. The methodological basis of the work is a systematic review and critical analysis of contemporary scientific research. Particular attention is paid to regional differences in the scale of impact and correlational dependencies between reservoir characteristics and pollution levels. Key patterns of anthropogenic pollution have been identified: progressive sedimentation with regional variability, which will lead to a loss of 25-26% of global reservoir storage capacity by 2050; a two-sided sedimentation effect with sediment accumulation in the upper reaches and ecosystem degradation downstream; a three-phase model of heavy metal pollution with sequential stages of low pollution, rapid pollution, and pollution control; a paradoxical distribution of pollutants with decreasing concentrations in the water column while increasing content in bottom sediments; age-dependent and urbanization-dependent accumulation of heavy metals; a thermal-geochemical relationship that intensifies eutrophication through internal phosphorus remobilization and creation of hypoxic conditions. It has been established that cadmium concentrations can exceed background values by 6-7 times, and older reservoirs demonstrate a loss of storage capacity up to 50%. The scientific novelty of the work lies in the systematization and generalization of the most recent research from 2023-2025, which

integrates knowledge about sedimentation, heavy metal pollution, thermal stratification, and ecological consequences into a unified interdisciplinary framework for understanding the anthropogenic impact of hydrotechnical structures. The practical significance of the study lies in substantiating the need to implement comprehensive reservoir management strategies that include environmental water releases, artificial destratification technologies, and sediment management programs to minimize long-term environmental risks. The results of the work can be used in developing national water resources management strategies, planning environmental monitoring of reservoirs, and assessing the environmental impacts of new hydrotechnical structure construction. Further research should be directed toward developing predictive models of pollutant accumulation considering climate change and creating adaptive water quality management systems in reservoirs under conditions of increasing anthropogenic pressure.

Keywords: hydrotechnical structures, reservoirs, anthropogenic pollution, heavy metals, sedimentation, water quality, environmental risks.

References

- [1] J.M. Ndayiragije, and A. Nkuzimana, "Socio-environmental impacts of hydropower construction in Burundi," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, article e39084, 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40084.
- [2] J. Wang et al., "Progress and future of Chinas aquatic ecological environment protection," *River*, vol. 1, no. 2, pp. 87-102, 2024. doi: 10.1002/rvr.2.87.
- [3] Q. Xu, K. Zhou, and B. Wu, "Dam construction reshapes heavy metal pollution in soil/sediment in the three gorges reservoir, China, from 2008 to 2020," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, article 1269138, 2023. doi: 10.3389/fenvs.2023.1269138.
- [4] M. Eriksson, A. del Valle, and A. de la Fuente, "Droughts worsen air quality and health by shifting power generation," *Nature Communications*, vol. 16, article 60090-z, 2025. doi: 10.1038/s41467-025-60090-z.
- [5] X. Zhang, C. Fang, Y. Wang, X. Lou, Y. Su, and D. Huang, "Review of Effects of Dam Construction on the Ecosystems of River Estuary and Nearby Marine Areas," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, article 5974, 2022. doi: 10.3390/su14105974.
- [6] Q. Chen et al., "Fleischmann A.S., Yan H. and Tang L. River Damming Impacts on Fish Habitat and Associated Conservation Measures," *Reviews of Geo-physics*, vol. 61, article e2023RG000819, 2023. doi: 10.1029/2023RG000819.
- [7] J. Dietrich, A. Rickard, S.A. Sethi, S. Cuppett, and P. Sullivan, "Aquatic habitat response to small dam removal demonstrates recovery in three years," *Ecosphere*, vol. 16, article e70323, 2025. doi: 10.1002/ecs2.70323.
- [8] D. Perera, S. Williams, and V. Smakhtin, "Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, article 219, 2022. doi: 10.3390/su15010219.
- [9] Y. Chen, and X. Cai, "The Storage and Operation Changes of 256 Reservoirs Across the Contiguous United States," *Water Resources Research*, vol. 61, article e2024WR037372, 2025. doi: 10.1029/2024WR037372.
- [10] H. Bing, J. Zhou, Y. Wu, X. Wang, H. Sun, and R. Li, "Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China," *Environmental Pollution*, vol. 214, pp. 485-496, 2016. doi: 10.1016/j.envpol.2016.04.062.
- [11] S. Cui et al., "Heavy metals in reservoirs: pollution characteristics, remediation technologies, and future prospects," *Agricultural Ecology and Environment*, vol. 3, 2025. doi: 10.48130/aee-0025-0003.
- [12] J. Shi, L. Wang, Y. Yang, and T. Huang, "A case study of thermal and chemical stratification in a drinking water reservoir," *Science of the Total Environment*, vol. 848, article 157787, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157787.
- [13] F. Chaaya, B. Miller, M. Gordos, B. Tamburic, and S. Felder, "Artificial destratification options for reservoir management," *Science of the Total Environment*, vol. 967, article 178738, 2025. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178738.
- [14] Doyle E. The Worlds Dams Are Filling Up – But Not With Water. 2023. [Online]. Available: <https://therevelator.org/dams-sedimentation-study/>. Accessed on: Oct. 15, 2024.
- [15] A dwindling water supply caused by reservoir sedimentation troubles engineers. American Society of Civil Engineers. 2024. [Online]. Available: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/03/a-dwindling-water-supply-caused-by-reservoir-sedimentation-troubles-engineers>. Accessed on: Nov. 25, 2024.
- [16] Conowingo Dam. Chesapeake Bay Program. Chesapeake Bay Foundation. 2024. [Online]. Available: <https://www.chesapeakebay.net/issues/threats-to-the-bay/conowingo-dam>. Accessed on: Nov. 25, 2024.
- [17] H. Bing, Y. Liu, J. Huang, X. Tian, H. Zhu, and Y. Wu, "Dam construction attenuates trace metal contamination in water through increased sedimentation in the Three Gorges Reservoir," *Water Research*, vol. 217, article 118417, 2022. doi: 10.1016/j.watres.2022.118419.
- [18] M. Sojka, M. Ptak, J. Jaskuła, and V. Krasniqi, "Ecological and Health Risk Assessments of Heavy Metals Contained in Sediments of Polish Dam Reservoirs," *International Journal of Environmental Research and*

Public Health, vol. 20, no. 1, article 324, 2023. doi: **10.3390/ijerph20010324**.

- [19] A.M.N. Martellotta, D. Levacher, F. Gentile, G. Rani-
eri, T. Trabace, and A.F. Piccinni, "A Relevant Char-
acterization and Compatibility for Reuse the Sedi-
ments from Reservoirs in Southern Italy," *Applied Sci-
ences*, vol. 14, no. 2, article 727, 2024. doi:
10.3390/app14020727.

- [20] Kakhovka dam attack exposed toxic time bomb of
heavy metal pollution. Chemistry World. 2024.
[Online]. Available:
[https://www.chemistryworld.com/news/kakhovka-
dam-attack-exposed-toxic-time-bomb-of-heavy-
metal-pollution/4021155.article](https://www.chemistryworld.com/news/kakhovka-dam-attack-exposed-toxic-time-bomb-of-heavy-metal-pollution/4021155.article). Accessed on:
Nov. 25, 2024.

- [21] F. Alizadeh, M.H. Niksokhan, M.R. Nikoo, A. Mishra,
M. Al-Wardy, and G. Al-Rawas, "Enhancing water se-
curity through integrated decision-making and selec-
tive withdrawal for sustainable reservoir manage-
ment," *Scientific Reports*, vol. 15, article 32214, 2025.
doi: **10.1038/s41598-025-18027-5**.

- [22] M. Wang et al., "A triple increase in global river basins
with water scarcity due to future pollution," *Nature
Communications*, vol. 15, article 880, 2024. doi:
10.1038/s41467-024-44947-3.

Стаття надійшла 14.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Покшевніцька Т. В. Закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 166-173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351088>.

263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 331.461(467)

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351112

**АНАЛІЗ ПРИЧИН ТА ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ РИЗИКАМИ
У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

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 ;
Чеберячко С.І.	д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3281-7157 , e-mail: cheberiachko.s.i@nmu.one ;
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 ;
Шароватова О.П.	канд. пед. наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2736-2189 , e-mail: sharovatova.elen@ukr.net

В умовах сучасного світу, де зростає кількість природних катастроф, техногенних аварій, конфліктів та криз, встановлення причинно-наслідкових зв'язків та керування ризиками в надзвичайних ситуаціях (НС) є не просто актуальним, а необхідним підходом для збереження життів, ресурсів та стабільності суспільства. Мета статті полягає в розробці процесу керування ризиками НС у відповідності до вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018. Для розробки процесу керування ризиками використано відомий метод «BOWTIE», який дозволяє виявити основні причинно-наслідкові зв'язки між небезпеками та небезпечними подіями, дозволяє описати та проаналізувати ризики операцій при НС. Процес керування ризиками НС, на відміну від процесу керування ризиками небезпек, фокусується на ідентифікації джерел небезпек та їх взаємозв'язків як між собою, так і між небезпечними чинниками, що можуть призвести до прояву НС. Розслідуючи обставини, при оцінюванні ризиків після настання першої небезпечної події потрібно враховувати, що для настання наступної небезпечної події попередня вже є небезпекою. Крім того, дослідження причин НС і оцінювання ризиків завжди передбачає врахунок впливу ланцюжка поєднання можливого прояву низки небезпечних чинників, які є вторинним проявом попередньої небезпечної події, який можна визначити при сценарному плануванні та визначенні динамічності прояву останніх. Наукова новизна полягає в інноваційному синтезі історії, стандартів менеджменту, розслідування причин та практичних уроків в галузі управління ризиками для екстремальних умов. Практична цінність визначається розробкою процесу керування ризиками надзвичайних ситуацій (зокрема, реєстр небезпек, реагування на аварійні ситуації) та рекомендацій, які можна застосовувати в бізнесі.

Ключові слова: надзвичайні ситуації, ризики, розслідування причин надзвичайних ситуацій, експедиція.

Постановка проблеми

Керування ризиками в надзвичайних ситуаціях (НС) є критично важливим процесом, оскільки дозволяє заздалегідь ідентифікувати загрози, мінімізувати їх наслідки та забезпечити швидке відновлення [1]. В умовах сучасного світу, де зростає кількість природних катастроф, техногенних аварій, конфліктів та криз (наприклад, через кліматичні зміни чи геополітичну нестабільність), такий підхід не просто актуальний, а необхідний для збереження життів, ресурсів та стабільності суспільства [2, 3]. Особливо в умовах, коли організації стикаються з безпрецедентними рівнями невизначеності.

Ефективне керування ризиками допомагає аналізувати і встановлювати потенційні небезпеки, оцінювати їх ймовірність та наслідки, що дозволяє зменшити соціально-економічні втрати [4]. Зокрема, в екологічних ризиках це забезпечує мінімізацію шкоди для

громад через системні заходи. Без такого підходу НС можуть призвести до непередбачуваних втрат, як-от у бізнесі чи державних структурах. Організації та органи влади можуть завчасно вирішувати невизначеності, захищати ресурси (людські, фінансові, матеріальні) та координувати дії під час криз. Це включає ідентифікацію небезпек та оцінювання ризику, впровадження запобіжних стратегій [5].

Рішення щодо керування ризиками НС на промислових підприємствах знаходиться у площині розвитку інтеграції стандартів систем менеджменту серії ISO. Разом з тим, окремого стандарту ISO для опису особливостей керування ризиками НС не існує. Виникає актуальна задача в розробці такого процесу, що допоможе уникнути зайвих збитків організаціям.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Автори статті [6] розглядають поняття комунікації ризиків в надзвичайних ситуацій з культурної, соціальної та медіа-перспектив. Комунікація ризику – спрямована на інформування й підготовку населення до потенційних загроз (природних чи техногенних подій). Авторка наголошує, що сприйняття ризику формується соціально – через медіа, культурні норми, впровадження населення. Важливим елементом комунікації є підзвітність, рівний доступ до інформації експертам і громадянам, прозорість і участь у діалозі. У підсумку авторка показує, як правильно вибудовувати комунікацію з населенням у двох пов'язаних, але різних контекстах: підготовки до ризику та дії під час надзвичайних ситуацій. Для цього пропонує застосовувати спеціальний інструментарій для ефективного інформування, підвищення обізнаності та мобілізації людей у кризових умовах.

Автори статті [7] висвітлюють роль цивільно-військової взаємодії під час пандемії, здатність армії реагувати на нетипові кризи, надають практичні рекомендації щодо зменшення можливих ризиків. Разом з тим, відсутність порівняльного аналізу з різними заходами реагування на локалізацію пандемії не дозволяє стверджувати про доцільність описаних рішень.

Автори роботи [8] систематизують основні напрями оцінки ризику та практик сталого управління катастрофами. Запропонована ідея з інтеграції методів: симуляції, соціальних опитувань, WebGIS, InSAR та моделі ситуаційної поінформованості, що дозволило провести різнопланову оцінку ризику НС. Проте, відсутність власної емпіричної бази, детального критичного аналізу та рекомендацій щодо адаптації в реальних контекстах обмежує практичну користь даної роботи.

Автори дослідження [9] сфокусувались на інтеграції підходів Disaster Risk Reduction (DRR) та інженерної стійкості закладів освіти – системах, що є критично важливим для сталого розвитку та безпеки суспільства. Автори виділяють основні ризики НС, зокрема невідповідну підготовку, відсутність цифрових технологій, слабкість інженерних споруд тощо, що не дозволяє своєчасно відреагувати на виклики можливих НС і тим самим погіршити підготовку фахівців. Нажаль, стаття є суто теоретичною, що призводить до непідкріплених емпіричними дослідженнями висновків.

Автори статті [10] проаналізували ризики, притаманні надзвичайним ситуаціям: порушення норм життєдіяльності, загроза життю/здоров'ю, економічні втрати тощо. Для зменшення їх впливу пропонується побудувати систему з чотирьох компонентів: планування, реагування, відновлення та пом'якшення наслідків, що відповідає сучасним стандартам криз-менеджменту. Однак, як і у попередній статті, матеріал є виключно теоретичним, аналіз реальних кейсів, даних чи прикладних досліджень не наведено.

Автори публікації [11] запропонували конкретний інструмент для керування ризиками в умовах відділення невідкладної допомоги, що робить дослідження прикладним і корисним для медичних закладів. Зокрема, розглядаються загрози, пов'язані з діагностикою, лікуванням та організаційними процесами, що підвищує якість медичної допомоги в умовах НС. Для аналізу ризиків застосовано метод FMECA (аналіз режиму, наслідків та критичності відмов), який базується на частоті, тяжкості та виявленні ризиків. Ці складові можна застосовувати у відділенні лікарні для покращення практики та безпеки, як це було у відділенні короткострокової госпіталізації лікарні.

Автори роботи [12] запропонували Cross-Organizational Emergency Intelligence System для подолання «організаційних розривів» у міському управлінні надзвичайними ситуаціями. Ця система забезпечує синхронізацію даних між відомствами, підтримку рішень, підвищення координації та стійкості. Автори наголошують, що їх система дозволяє інтегрувати потоки даних (стан доріг/мостів, ризики обстрілів, доступність паливно-енергетичних ресурсів, черги на пунктах пропуску), визначити маршрути та ресурси для забезпечення критичних об'єктів.

На основі аналізу наведених досліджень можна зробити узагальнений висновок щодо можливості побудови процесу керування ризиками НС відповідно принципам ISO 45001 (Система управління охороною здоров'я та безпекою праці). Більшість робіт розглядають процес керування ризиками, який частково корелює з вимогами ISO 45001. Зокрема, у сфері ідентифікації небезпек, оцінки ризиків і впровадження превентивних заходів. Проаналізовані статті, присвячені різним аспектам ISO 45001. Так, у статті [5] описуються вимоги до комунікації (розділ 7 зазначеного стандарту). Практична реалізація оцінювання ризиків розглядається в роботі [10], де пропонується цю процедуру проводити методом FMECA. Також про необхідність застосування процесного підходу до керування ризиками НС говориться в роботі [9]. Водночас більшість робіт залишаються теоретичними, без системного аналізу небезпек для персоналу, без чітких показників ефективності та без інтеграції в загальну систему менеджменту охорони праці, що є ключовими елементами ISO 45001. Звідси визначається актуальна задача з розробки процесу керування ризиками НС, що відповідає стандарту ISO 45001 та забезпечить відповідність вимогам Рамкової стратегії у сфері охорони здоров'я і безпеки працівників на 2021-2027 роки. Зокрема, мова йде про готовість до майбутніх криз.

Мета статті

Для розробки процесу керування ризиками скористаємось відомим методом «BOWTIE» (рис. 1). Він дозволяє виявити основні причинно-наслідкові зв'язки між небезпеками та небезпечними подіями, дозволяє

Досвід Шеклтона трансформується з пригодницького епосу в академічний аналіз для вивчення принципів керування ризиками НС та забезпечення організаційної стійкості [15]. Для цього скористаємось вимогами ISO 45001, які дозволяють деконструювати легенду на конкретні управлінські процеси, що включають підготовку до експедиції, плавання, зимування на судні на кризі, плавання на рятувальних шлюпках, похід

за порятунком, перехід через гори та інше (табл. 1) [20]. Застосування вимог ISO 45001 до історичних подій дозволяє виявити як системні, майже фатальні недоліки в стратегічному плануванні експедиції, так і геніальні інтуїтивні рішення Шеклтона на операційному рівні, які де-факто відповідали, а подекуди й випереджали сучасні вимоги до реагування на надзвичайні ситуації на основі керування ризиками.

Таблиця 1

Хронологія та управлінські рішення Шеклтона (1914–1917)

Етап	Період	Подія	Дії та рішення Е. Шеклтона
1. Підготовка	До серпня 1914	Відбір команди та старт експедиції	Підбір кадрів. Обирав людей не лише за навичками, а за характером (оптимізм, сумісність). Питав: «Ви вмієте співати?». Кризове рішення. Коли почалася війна, запропонував судно Адміралтейству. Отримавши відмову («Продовжуйте»), взяв на себе відповідальність за моральний стан екіпажу, який залишав батьківщину, що воює.
2. Плавання	Серпень – Грудень 1914	Зупинка на о. Пд. Джорджія. Попередження про паковий лід	Рішення почати експедиції. Вислухав китобойів про аномальні льоди, але вирішив не зимувати на острові, щоб не втратити рік. Він прийняв ризик, покладаючись на міцність судна.
3. Зимування на судні	Січень – Жовтень 1915	Дрейф у льодовому полоні	Боротьба за дисципліну. Ввів суворий розпорядок дня (прибирання, вахти), щоб запобігти апатії. Тімблдінг. Обов'язкові вечірні соціалізації (ігри, вистави). Змішував каюти, щоб офіцери та матроси спілкувалися, руйнуючи класові бар'єри.
4. Втрата судна	Жовтень 1915	<i>Endurance</i> розчавлено льодом. Евакуація	Символічне лідерство. Першим викинув свої золоті речі та Біблію (вирвавши сторінку з псалмом), але наказав зберегти банджо Хассі, назвавши це «ментальними ліками». Зміна мети. Спокійно оголосив: «Корабля більше немає. Тепер наше завдання – вижити».
5. Зимування на кризі	Листопад – Квітень 1916	Життя в наметах «Табір Терпіння»	Гасіння бунту. Коли тесляр Макніш відмовився коритися (аргументуючи, що контракт закінчився із загибеллю судна), Шеклтон зачитав Устав судна і жорстко припинив непокору, щоб уникнути анархії. Емпатія. Віддавав свої порції їжі найслабшим членам команди, роблячи це непомітно.
6. Плавання на о. Елефант	9-15 квітня 1916	Перехід у шлюпках	Лідерство прикладом. Шеклтон стояв за стерном задньої шлюпки, щоб бачити всіх інших. Майже не спав 7 діб. Психологічна підтримка. Коли бачив, що люди замерзають і впадають у відчай, починав співати або кричати команди, щоб змусити їх рухатися.

Продовження таблиці 1

Етап	Період	Подія	Дії та рішення Е. Шеклтона
7. Розподіл груп	Квітень 1916	Прибуття на острів. Підготовка <i>James Caird</i>	Ізоляція негативу. У рятувальну шлюпку <i>James Caird</i> він узяв не найсильніших, а «проблемних» (зокрема бунтівника Макніша та панікера Вінсента), щоб вони не деморалізували основну групу, яка залишилася чекати. Делегування. Довірив життя 22 людей на острові своєму заступнику Френку Вайлду, в якому був впевнений на 100%.
8. Похід за порятунком	24 квітня – 10 травня 1916	1300 км океаном у шлюпці	Управління ресурсами. Особисто контролював видачу води (якої було критично мало). Підтримка. Навіть у шторм намагався організувати гарячу їжу (молоко на примусі) кожні 4 години, розуміючи, що тепло – єдине, що тримає людей живими.
9. Перехід через гори	19-20 травня 1916	36 годин через хребти Пд. Джорджії	Інтуїтивне рішення. На вершині хребта, коли насувалася ніч і буря (що означало смерть від холоду), Шеклтон наказав сісти на рюкзаки і з'їхати схилом у невідомість. Це був «стрибок віри», який врятував їм життя. Контроль стану. Не дозволяв зупинятися на сон більше ніж на 5 хвилин, розуміючи, що вони вже не прокинуться.
10. Рятувальна операція	Травень – Серпень 1916	4 спроби повернутися на о. Елефант	Наполегливість. Не прийняв «ні» від урядів та власників суден. Використовував дипломатію та тиск, щоб отримати кораблі. Фінал. Коли судно <i>Yelcho</i> підійшло до острова, Шеклтон в бінокль перерахував фігурки на березі і крикнув: «Всі тут!», що стало для нього найвищою нагородою.

Море Ведделла, куди прямував «Ендьюранс», історично вважалось найнебезпечнішим сектором Антарктики через свої специфічні гідрометеорологічні умови. Основною зовнішньою загрозою був паковий лід, що дрейфує [21]. На відміну від стаціонарного припаю, паковий лід перебуває в постійному русі під впливом вітрів та океанічних течій. Цей рух створює колосальний компресійний тиск, здатний деформувати та руйнувати корпуси навіть спеціалізованих суден.

Шеклтон отримав попередження про аномально важкі льодові умови ще під час зупинки на китобійній станції Грютвікен на острові Південна Джорджія в листопаді 1914 року. Місцеві китобої, які володіли унікальними знаннями про поточний стан акваторії, повідомляли про те, що лід простягається значно далі на північ, ніж зазвичай. Ігнорування цієї інформації на етапі стратегічного планування стало першим критичним збоєм у системі оцінювання ризиків НС. Також потрібно відмітити, що трагічність ситуації, що виникла з кораблем, на якому подорожували вчені, підсилювалась температурним режимом (стовпчик термометра регулярно опускався нижче -30°C). Це створювало

перманентну загрозу гіпотермії та глибоких обморожень. Ситуація також ускладнювалася повною географічною ізоляцією. Після відплиття з Грютвікена 5 грудня 1914 року екіпаж втратив будь-який фізичний та інформаційний контакт із зовнішнім світом на 497 днів. Відсутність засобів дальнього радіоз'язку (технології того часу не мали змоги передавати сигнал на такі відстані з наявним обладнанням) робила зовнішню допомогу неможливою. Це означало, що «Плану Б», тобто рятувальної операції ззовні, не було взагалі, що критично підвищувало тяжкість наслідків будь-якого інциденту [16].

Критичним аспектом для оцінювання ризиків НС є відповідність інженерних засобів контролю умовам експлуатації. Тривалий час існував міф про те, що «Ендьюранс» був найміцнішим дерев'яним судном свого часу, і його загибель стала результатом непереборних сил природи. Однак сучасні дослідження, проведені після виявлення уламків судна у 2022 році, а також докладний аналіз суднобудівних креслень та архівних документів, указують на серйозні невідповідності в конструкції.

Дослідження показують, що «Ендьюранс» (спочатку корабель мав назву «Polaris») був спроектований переважно для умов Арктики, де судна частіше оперують на кромці льоду, а не для глибокого проникнення в масиви антарктичного пакового льоду, що характеризується значно вищим тиском стиснення.

Порівняльний аналіз з іншими полярними суднами, такими як «Фрам» Фрітьофа Нансена, виявляє суттєві відмінності. Так, корабель «Фрам» мав округлий корпус, який давав судну змогу «вислизити» вгору під тиском льоду. Натомість «Ендьюранс» мав більш традиційні, прями борта, що робило його вразливим до затискання [17].

Найслабшим місцем конструкції виявилася ділянка машинного відділення. Ця секція була непропорційно великою порівняно з іншими полярними суднами того часу і, що критично важливо, їй бракувало достатньої кількості поперечних балок та розпірок для опору бічному стисненню. Саме в цьому місці корпус зрештою не витримав тиску.

Важливо зазначити, що Шеклтон знав про ці слабкі сторони ще до відплиття. Архівні дані підтверджують: дослідник усвідомлював, що судно не ідеально підходить для поставленого завдання. Це вказує на свідоме прийняття високого рівня залишкового ризику заради досягнення амбітної мети, що суперечить сучасному принципу ALARP [18].

Результати та їх обговорення

На першому етапі керування ризиками НС виникає необхідність у побудові відповідної моделі, яка б представила причинно-наслідковий взаємозв'язок між небезпкою – небезпечною подією та наслідками (рис. 3) між різними небезпеками та небезпечними подіями, які характерні основі експедиції Шеклтона. Наприклад, до фізичних / механічних факторів відноситься компресійне стиснення судна паковим льодом, тоді як кліматичні небезпеки пов'язані з екстремально низькими температурами, штормовим вітром тощо (табл. 2).



Рис. 3 – Модель керування ризиками НС експедиції Шеклтона

Таблиця 2

Реєстр ключових небезпек та оцінка ризиків НС

Категорія небезпек	Небезпека	Потенційні наслідки	Оцінка ризику (до заходів)	Запобіжні і захисні заходи по зниженню ризиків небезпек
Фізичні / Механічні	Компресійне стиснення судна паковим льодом	Руйнування корпусу, втрата притулку та припасів, загибель у крижаній воді (перша небезпечна подія)	Неприйнятний	Моніторинг льодової обстановки, підготовка до евакуації («Ocean Camp»), переміщення ресурсів на лід, порятунок шлюпок [8]
Кліматичні	Екстремально низькі температури, штормовий вітер, вологість	Гіпотермія, обмороження кінцівок, гангрена, смерть (друга небезпечна подія)	Неприйнятний	Використання спеціалізованого одягу (Burberry gabardine), спальних мішків з оленячих шкур, взаємний огляд на предмет білих плям обмороження, сон у тісному контакті для збереження тепла [11]

Продовження таблиці 2

Категорія небезпеки	Небезпека	Потенційні наслідки	Оцінка ризику (до заходів)	Запобіжні і захисні заходи по зниженню ризиків небезпек
Біологічні / Харчові	Дефіцит вітамінів (особливо С і В1), одноманітний раціон, зіпсовані консерви	Цинга (скорбут), авітаміноз (бері-бері), харчові отруєння, виснаження (друга небезпечна подія)	Неприйнятний	Полювання на свіжу дичину (тюлені, пінгвіни) як джерело вітамінів, суворий контроль раціону, відмова від підозрілих запасів, використання пеммікану [17]
Психо соціальні	Сенсорна депривація, ізоляція, невідомість майбутнього, темрява полярної ночі	Депресія, тривожні розлади, конфлікти, психози, втрата волі до боротьби (друга небезпечна подія)	Неприйнятний	Структурування часу (рутина), спільні заходи (читання, ігри), лідерська присутність, святкування, прозорість інформації, музика [17]
Навігаційні	Шторми в Південному океані, складні течії, навігація без орієнтирів	Перекидання шлюпок, втрата курсу, розбиття об скелі, утоплення (третя небезпечна подія)	Неприйнятний	Використання навігаційного досвіду капітана Ворслі, технічна модифікація шлюпок (підвищення бортів, палуба), ретельне планування маршруту [26]

Особливістю керування ризиками НС є фокус на екстремальні події (Low Probability, High Consequence), які руйнують звичний порядок і вимагають не просто запобігання небезпекам, а розробки стратегій виживання. Звертаючись до прикладу «експедиції Ернеста Шеклтона», можна виявити взаємопов'язані декілька небезпечних подій, які виникли через прояв небезпеки – дрейфуючу пакову кригу. На відміну від стаціонарного припаю, паковий лід у морі Ведделла перебуває в постійному русі під впливом вітрів та океанічних течій. Цей

рух створює колосальний компресійний тиск, здатний деформувати та руйнувати корпуси навіть спеціалізованих суден.

Знищення корабля призводить до настання другої небезпечної події – дефіциту продуктів харчування. У свою чергу, ресурсний голод та відсутність зв'язку призводить до необхідності самостійного порятунку на рятувальних шлюпках, що призводить до нової небезпечної події – їх перекидання через обмерзання, шторми, той же дрейфуючий лід (рис. 4).

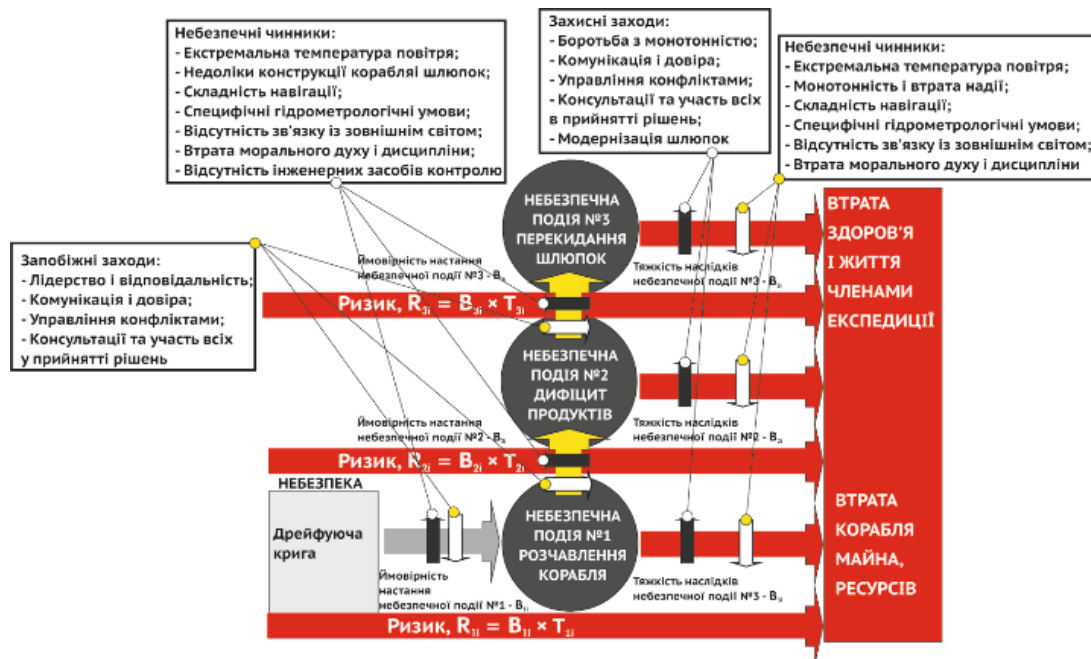


Рис. 4 – Модель оцінки ризиків НС на основі експедиції Шеклтона

Особливістю керування ризиками НС є динамічність проведення оцінок і прийнятих рішень. Прикладом ефективної «динамічної оцінки ризиків» (dynamic risk assessment) стало рішення Шеклтона припинити спробу пішого маршу по льоду до острова Полет. Після кількох днів виснажливої праці, коли команді вдалося подолати лише кілька миль, тягнучи важкі шлюпки через тороси, Шеклтон переоцінив ситуацію. Він визначив, що ризик виснаження калорій (Energy Expenditure) та ймовірність пошкодження шлюпок (Critical Asset Integrity) є значно вищими, ніж ризик залишатися на дрейфуючій крижині. Було прийнято рішення зупинитися і заснувати «Табір Терпіння» (Patience Camp). Ця зміна тактики, що базувалася на

реальній оцінці прогресу та ресурсів, ймовірно, врятувала експедицію, зберігши сили людей для вирішального етапу, коли лід почав розпадатися [17].

Процес керування ризиком небезпеки, зазвичай, працює з лівою частиною моделі «краватка – метелик» (рис. 5), шукаючи можливості для запобігання настання небезпечної події. Процес керування ризиком НС зосереджується на правій частині (відновлення): що робити, коли подія вже сталася (корабель вже затиснуто). Так, для Шеклтона у разі попередньої оцінки ризику небезпек, яка виявила загрозу розчавлення корабля кригою (рис. 3), вимагалось застосування превентивної дії з укріплення його корпусу (не спрацювало).

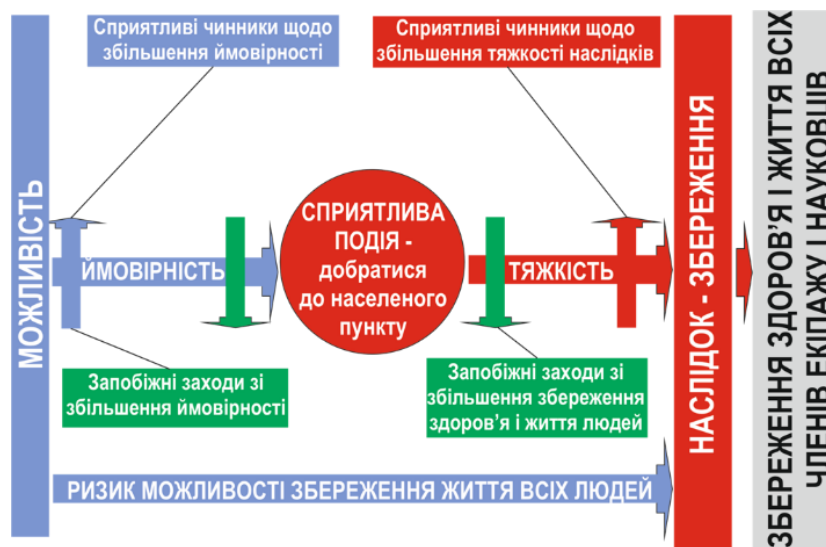


Рис. 5 – Модель керування ризиком можливості врятування всіх членів екіпажу судна і експедиції Ернеста Шеклтона

Оцінювання ризику НС потребувало зосередження на виживанні колективу, а отже це наявність шлюпок, запасів їжі на льоду, моральна підготовка до зимівлі тощо. Крім того, ще однією відмінністю керування ризиками НС є динамічність прояву різних небезпечних чинників. Це потребує, в першу чергу, застосування процесного підходу до визначення можливих сценаріїв розвитку події та опрацювання декількох стратегій дій для уникнення втрати життів людей. Звідси формується основна відмінність керування ризиками НС, яка полягає у проведенні аналізу взаємозалежностей між різними небезпечними подіями і появою нових небезпек, що можуть призвести до вторинних чи третинних нових небезпечних подій (рис. 3).

В умовах обмежених ресурсів їх правильний розподіл стає питанням життя і смерті. Управління запасами їжі. Після втрати корабля Шеклтон запровадив сувору систему нормування. Він особисто контролював видачу їжі, забезпечуючи справедливий розподіл, що підтримувало довіру в колективі. Важливим рішенням став перехід на місцеву фауну (м'ясо тюленів і пінгвінів), що не лише економило запаси, але й, як

зазначалося вище, запобігало захворюванню на цингу. Однак ближче до кінця дрейфу команда зіткнулася з нестачею навіть цієї їжі і довелося приймати важкі рішення, зокрема, відстріл іздових собак, які були споживачами дефіцитного м'яса, а згодом і самі стали їжею.

Успіх навігації шлюпки «Джеймс Кейрд» залежав тільки від професійної компетентності капітана Френка Ворслі. В умовах шторму, маючи можливість бачити сонце чи зірки лише епізодично, він зумів прокласти курс до крихітної точки в океані – Південної Джорджії. Помилка навіть на один градус означала б смерть у відкритому океані. Це підкреслює важливість вимоги ISO 45001 щодо компетентності осіб, які виконують роботи, що впливають на безпеку.

Попри те, що експедиція зазнала невдачі в досягненні географічної мети, з позицій ISO 9001:2015 «Системи управління якістю. Вимоги і настанови» та ISO 45001:2018 «Системи управління охороною здоров'я і безпекою праці. Вимоги і настанови», вона досягла найвищого показника дієвості системи управління охороною здоров'я і безпекою праці **на роботі:**

нульова смертність серед членів команди «Ендьюранс» (Zero Fatality Rate).

Отже, процес керування ризиками НС включає наступні кроки:

1. Ідентифікація небезпек та потенційних НС (інтеграція з підрозділом 6.1.2.1). Визначення джерел небезпек, їх взаємозв'язків як між собою, так і між небезпечними чинниками, що можуть призвести до НС. Формування процесу взаємозалежних небезпечних подій.

2. Оцінка ризиків (інтеграція з підрозділом 6.1.2.2). Оцінка ймовірності настання НС та тяжкості (наприклад, соціально-економічні втрати, загибель людей), що передбачає врахування для настання наступної небезпечної події попередньої, як небезпеки. Крім того, оцінювання ризиків завжди передбачає обрахунок впливу ланцюжка поєднання можливого прояву низки небезпечних чинників, які є вторинним проявом попередньої небезпечної події, який можна визначити при сценарному плануванні та визначенні динамічності прояву останніх.

3. Планування та контроль (розділ 8.2). Розробка планів реагування, включаючи ресурси, комунікацію, тренування.

4. Реагування та відновлення (розділи 8.2 + 10.3). Під час НС – активація планів, мінімізація шкоди, пост-аналіз для вдосконалення (включає психосоціальну підтримку та мотивацію).

Основною відмінністю процесу керування ризиками НС є фокус на взаємозв'язку між різними небезпечними подіями з потенціалом катастрофічних наслідків, що дозволяє виявити як зовнішні небезпечні чинники, так і внутрішні, та підібрати відповідні запобіжні дії для уникнення найгіршого сценарію розвитку подій з відповідними неприйнятними наслідками.

Висновки

Аналіз історії виживання екіпажу «Ендьюранс» крізь призму вимог стандарту ISO 45001:2018 дає змогу зробити такі висновки: лідерство є фундаментом безпеки [20]. Успіх порятунку ґрунтувався на тому, що Шеклтон інтуїтивно, але повною мірою реалізував вимоги розділу 5 ISO 45001 [21]. Він демонстрував лідерство, брав на себе повну відповідальність, забезпечував участь працівників і ставив безпеку людей вище за будь-які інші цілі. Також сприятливим чинником було уміння адаптуватися та управляти змінами. Здатність відмовитися від початкового плану (омана незворотних витрат) та адаптуватися до нових, значно гірших умов (відповідність п. 8.1.3), стала вирішальним чинником виживання. Гнучкість тактики та незмінність стратегічної мети (виживання) є головною характеристикою стійкої системи управління безпекою і здоров'ям на роботі. Наступним позитивним моментом стало забезпечення психосоціальної безпеки. Експедиція довела, що в екстремальних умовах управління (стресом) ментальним станом колективу є таким самим

критичним виробничим чинником, як і забезпечення фізичних потреб. Методи Шеклтона цілком узгоджуються із сучасними настановами ISO 45003 [22].

Історія «Ендьюранс» залишається актуальною не лише як приклад героїзму, але і як практична настанова. Вона доводить, що навіть за відсутності сучасних технологій, GPS і сертифікованих систем управління охороною здоров'я та безпекою праці, суворе дотримання фундаментальних вимог, принципів ISO 45001 – оцінювання керування ризиками, пріоритету людського життя, компетентності та лідерства – здатне забезпечити безпеку та виживання в найсуворіших умовах на планеті – Антарктиді.

Для повноти аналізу системи управління безпекою і здоров'ям на роботі необхідно згадати про другу частину експедиції – загін моря Росса на кораблі «Аврора» (Aurora) [23, 24]. Їхнім завданням було закладання складів з продовольством на іншому боці континенту для групи Шеклтона. На відміну від групи Шеклтона, цей загін зазнав людських втрат (загинули троє людей, серед них командир Енес Макінтош). Причинами невдачі стали:

1. Втрата критичної інфраструктури. «Аврору» зірвав з якоря шторм, залишивши берегову групу без основних припасів та спорядження. Це приклад реалізації ризику «втрата ресурсів» без належного плану безперервності бізнесу.

2. Відсутність лідерства та дисципліни. На відміну від Шеклтона Макінтош не зміг підтримати таку ж залізну дисципліну та згуртованість людей. Рішення Макінтоша та Гейворда рухатися нестійкою кригою під час хуртовини (що призвело до їх зникнення) було порушенням правил безпеки та помилкою в оцінюванні погодних ризиків.

3. Розрив комунікації. Відсутність чіткої координації та поділ групи призвели до фатальних наслідків.

Цей контраст підкреслює, що успіх Шеклтона був не випадковим, він став результатом його специфічного підходу до управління людьми та керування ризиками. У момент остаточної загибелі корабля Ернест Шеклтон промовив легендарну фразу: «Він іде, хлопці!» і спокійно продовжив організацію евакуації. Він не витрачав дорогоцінні ресурси та енергію на марні спроби врятувати судно, коли це стало очевидно неможливим. Фокус миттєво змістився на збереження життя і здоров'я членів екіпажу й експедиції. Це демонструє чітку ієрархію цінностей, де життя людини є безумовним пріоритетом над матеріальними активами, що є фундаментом будь-якої зрілої культури безпеки.

Процес керування ризиками НС, на відміну від процесу керування ризиками небезпек, фокусується на ідентифікації джерел небезпек та їх взаємозв'язків як між собою, так і між небезпечними чинниками, що можуть призвести до прояву НС. При оцінюванні ризиків після настання першої небезпечної події потрібно враховувати, що для настання наступної небезпечної події попередня вже є небезпекою. Крім того, оцінювання ризиків завжди передбачає обрахунок впливу

ланцюжка поєднання можливого прояву низки небезпечних чинників, які є вторинним проявом попередньої небезпечної події, який можна визначити при сценарному плануванні та визначенні динамічності прояву останніх.

Перелік використаних джерел

- [1] Ключка Ю. П. Оцінка результатів надзвичайної ситуації з врахуванням ризик-орієнтованого підходу. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2016. Вип. 24. С. 72-76.
- [2] Чайкіна А. Особливості інтеграції ризик-менеджменту в систему управління підприємством. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 39. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-5>.
- [3] Єрмак С. О., Шелевер А. М. Управління ризиками підприємства в сучасних умовах господарювання. *Економічні перспективи підприємництва в Україні*: збірник матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, Ірпінь, 26-27 жовтня 2017. Ч. 2. С. 81-83.
- [4] Захарова Н. Ю. Управління ризиками на підприємстві: сутність, підходи та методи. *Бізнес Інформ*. 2023. № 1. С. 203-209. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-1-203-209>.
- [5] Лошенко О., Мурована Т. Ризики ведення бізнесу в умовах воєнного стану та шляхи їх подолання. *Ефективна економіка*. 2023. № 2. С. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.2.44>.
- [6] Cubeddu F. Risk and Emergency Communication. *Encyclopedia*. 2025. Vol. 5, iss. 4. Article 183. DOI: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5040183>.
- [7] Tušer I., Hoskova-Mayerova S. Emergency Management in Resolving an Emergency Situation. *Journal of Risk and Financial Management*. 2020. Vol. 13(11). Article 262. DOI: <https://doi.org/10.3390/jrfm13110262>.
- [8] Inan D. I., Beydoun G., Othman S. H. Risk Assessment and Sustainable Disaster Management. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(6). Article 5254. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065254>.
- [9] Lillywhite B., Wolbring G. Risk Narrative of Emergency and Disaster Management, Preparedness, and Planning (EDMPP): The Importance of the «Social». *Sustainability*. 2023. Vol. 15(1). Article 387. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010387>.
- [10] Левицька А. В., Гриценко А. А. Управління ризиками енергетичної компанії при переході на нову модель електроенергетичного ринку. *Економічний журнал Одеського політехнічного університету*. 2019. № 1(7). С. 26-31. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3332881>.
- [11] Attinger L., Wolter L., Della Santa V. Gestion du risque clinique aux urgences : utilisation d'un outil pragmatique. *Revue Medicale Suisse*. 2025. Vol. 21(927). Pp. 1450-1453. DOI: <https://doi.org/10.53738/revmed.2025.21.927.47561>.
- [12] Guo H., Jiang Y., Li E. Y. Enhancing Organizational Resilience in Emergency Management: A Cross-Organizational Intelligence System for Sustainable Response to Crisis. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(11). Article 5000. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17115000>.
- [13] Аналіз причинно-наслідкових зв'язків у хронології подій катастрофи на Байконурі / В. А. Цопа та ін. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2023. Т. 4, № 178. С. 252-261. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-252-261>.
- [14] Penny B. Crisis and Uncertainty — 5 LEADERSHIP Lessons from Shackleton's ENDURANCE Expedition. URL: <https://blaine-penny.medium.com/crisis-and-uncertainty-5-leadership-lessons-from-shackletons-endurance-expedition-ccff181f5af1> (дата звернення: 15.05.2025).
- [15] The Shackleton Approach: Effective Leadership throughout the Claims Process – IRMI. URL: <https://www.irmi.com/articles/expert-commentary/the-shackleton-approach-effective-leadership-throughout-the-claims-process> (дата звернення: 21.05.2025).
- [16] Leadership in Crisis: Ernest Shackleton and the Epic Voyage of the Endurance-Case-Faculty & Research-Harvard Business School. URL: <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=29815> (дата звернення: 03.06.2025).
- [17] Sir Ernest Shackleton, Endurance Voyage Timeline and Map - Cool Antarctica. URL: https://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/History/Ernest_Shackleton_map_time_line.php (дата звернення: 03.06.2025).
- [18] Nourishing food, clean air and exercise: medical debates over environment and polar hygiene on Robert Falcon Scott's British National Antarctic expedition, 1901–1904. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11655163/> (дата звернення: 15.06.2025).
- [19] ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use : International standard. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 41 p.
- [20] Parikka K. OHS Management Principles of ISO 45001. URL: <https://blog.falcony.io/en/ohs-management-principles-of-iso-45001> (дата звернення: 15.06.2025).
- [21] Hammar M. ISO 45001 management of change explained. URL: <https://advisera.com/45001academy/blog/2019/11/14/iso-45001-management-of-change-explained/> (дата звернення: 10.06.2025).
- [22] ISO 45001 Clause 6.1.2.1 Hazard Identification. URL: https://www.youtube.com/watch?v=7FTV_MXI0Dc (дата звернення: 30.05.2025).
- [23] Deconstructing moral leadership: lessons from endurance in Antarctica – strategica conference. URL: <https://strategica-conference.ro/wp->

<content/uploads/2022/05/12-1.pdf> (дата звернення: 05.07.2025).[24] Shackleton's legendary open boat voyage- the re-enactment – Sail-World.com. URL: <https://www.sail-world.com/-97694/> (дата звернення: 10.07.2025).

ANALYSIS OF REASONS AND FEATURES OF RISK MANAGEMENT IN EMERGENCY SITUATIONS

Tsopa V.	D.Sc. (Engineering), professor, International Management Institute, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Cheberyachko S.	D.Sc. (Engineering), professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3281-7157 , e-mail: cheberiachko.s.i@nmu.one ;
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 ;
Sharovatova O.	PhD (Pedagogical Sciences), associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2736-2189 , e-mail: sharovatova.elen@ukr.net

In the modern world, where the number of natural disasters, man-made accidents, conflicts and crises is increasing, establishing causal relationships and managing risks in emergencies is not just relevant, but a necessary approach to saving lives, resources and the stability of society. The purpose of the article is to develop a process for managing emergency risks in accordance with the requirements of the international standard ISO 45001:2018. To develop the risk management process, the well-known «BOWTIE» method was used, which allows identifying the main causal relationships between hazards and dangerous events, allows describing and analyzing the risks of operations in emergencies. The process of managing emergency risks, in contrast to the process of managing hazard risks, focuses on identifying sources of hazards and their relationships both among themselves and between dangerous factors that can lead to the manifestation of emergencies. When investigating the circumstances, when assessing risks after the first dangerous event, it is necessary to take into account that for the next dangerous event to occur, the previous one is already a danger. In addition, the study of the causes of emergencies and risk assessment always involves calculating the impact of the chain of combination of possible manifestations of a number of dangerous factors, which are secondary manifestations of the previous dangerous event, which can be determined during scenario planning and determining the dynamics of the manifestation of the latter. The scientific novelty lies in the innovative synthesis of history, management standards, investigation of causes and practical lessons in the field of risk management for extreme conditions. The practical value is determined by the development of a process for managing the risks of emergencies (in particular, a hazard register, response to emergency situations) and recommendations that can be applied in business.

Keywords: emergencies, risks, investigation of the causes of emergencies, expedition.

References

- [1] Yu.P. Kliuchka, "Otsinka rezultativ nadzvychainoi situatsii z vrakhuvanniam ryzyk-oriientovanoho pidkhodu" ["Assessment of the results of an emergency situation taking into account a risk-oriented approach"], *Problemy nadzvychainykh situatsii – Problems of Emergency Situations*, vol. 24, pp. 72-76, 2016. (Ukr.)
- [2] A. Chaikina, "Osoblyvosti intehtratsii ryzyk-menedzhmentu v systemu upravlinnia pidpriemstvom" ["Features of risk management integration into the enterprise management system"], *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, vol. 39, 2022. doi: 10.32782/2524-0072/2022-39-5. (Ukr.)
- [3] S.O. Yermak, and A.M. Shelever, "Upravlinnia ryzykamy pidpriemstva v suchasnykh umovakh hospodariuvannia" ["Enterprise risk management in modern business conditions"], in *Proc. of the Int. Sci.-Pract. Conf. «Economic prospects of entrepreneurship in Ukraine»*, Irpin, Ukraine, Oct. 26-27, 2017, vol. 2, pp. 81-83. (Ukr.)
- [4] N.Yu. Zakharova, "Upravlinnia ryzykamy na pidpriemstvi: sutnist, pidkhody ta metody" ["Risk Management in the Enterprise: The Essence, Approaches, and Methods"], *Biznes Inform*, № 1, pp. 203-209, 2023. doi: 10.32983/2222-4459-2023-1-203-209. (Ukr.)
- [5] O. Losheniuk, and T. Murovana, "Ryzyky vedennia biznesu v umovakh voiennoho stanu ta shliakhy yikh podolannia" ["Risks of doing business under martial law and ways to overcome them"], *Efektivna ekonomika*, № 2, pp. 1-17, 2023. doi: 10.32702/2307-2105.2023.2.44. (Ukr.)
- [6] F. Cubeddu, "Risk and Emergency Communication," *Encyclopedia*, vol. 5, iss. 4, article 183, 2025. doi: 10.3390/encyclopedia5040183.
- [7] I. Tušer, and S. Hoskova-Mayerova, "Emergency Management in Resolving an Emergency Situation,"

- Journal of Risk and Financial Management*, vol. 13(11), article 262, 2020. doi: [10.3390/jrfm13110262](https://doi.org/10.3390/jrfm13110262).
- [8] D. I. Inan, G. Beydoun, and S. H. Othman, "Risk Assessment and Sustainable Disaster Management," *Sustainability*, vol. 15(6), article 5254, 2023. doi: [10.3390/su15065254](https://doi.org/10.3390/su15065254).
- [9] B. Lillywhite, and G. Wolbring, "Risk Narrative of Emergency and Disaster Management, Preparedness, and Planning (EDMPP): The Importance of the «Social»,»" *Sustainability*, vol. 15(1), article 387, 2023. doi: [10.3390/su15010387](https://doi.org/10.3390/su15010387).
- [10] A. V. Levytska, and A. A. Grycenko, "Upravlinnia ryzykamy enerhetychnoi kompanii pry perekhodi na novu model elektroenerhetychnoho rynku" ["Risk management of the energy company in the transition to a new electricity market model"], *Ekonomichnyi zhurnal Odeskoho politekhnichnoho universytetu – Economic journal Odessa polytechnic university*, № 1(7), pp. 26-31, 2019. doi: [10.5281/zenodo.3332881](https://doi.org/10.5281/zenodo.3332881). (Ukr.)
- [11] L. Attinger, L. Wolter, and V. Della Santa, "Gestion du risque clinique aux urgences : utilisation d'un outil pragmatique" ["Risk management in the emergency department : example of a pragmatic tool"], *Revue Medicale Suisse – Swiss Medical Review*, vol. 21(927), pp. 1450-1453, 2025. doi: [10.53738/revmed.2025.21.927.47561](https://doi.org/10.53738/revmed.2025.21.927.47561). (Fra.)
- [12] H. Guo, Y. Jiang, and E.Y. Li, "Enhancing Organizational Resilience in Emergency Management: A Cross-Organizational Intelligence System for Sustainable Response to Crisis," *Sustainability*, vol. 17(11), article 5000, 2025. doi: [10.3390/su17115000](https://doi.org/10.3390/su17115000).
- [13] V. Tsopa, S. Cheberyachko, O. Deryugin, N. Sushko, O. Sharovatova, "Analiz prychynno-naslidkovykh zaviazkiv u khronolohii podii katastrofy na Baikonuri" ["Analysis of cause-effect relations in the chronology of the events of the baikonur disaster"], *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: Tekhnichni nauky ta arkhitektura – Municipal economy of cities. Series: Technical Sciences and Architecture*, vol. 4, iss. 178, pp. 252-261, 2023. doi: [10.33042/2522-1809-2023-4-178-252-261](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-252-261). (Ukr.)
- [14] Penny B. Crisis and Uncertainty — 5 LEADERSHIP Lessons from Shackleton's ENDURANCE Expedition. [Online]. Available: <https://blaine-penny.medium.com/crisis-and-uncertainty-5-leadership-lessons-from-shackletons-endurance-expedition-cdff181f5af1>. Accessed on: May 15, 2025.
- [15] The Shackleton Approach: Effective Leadership throughout the Claims Process – IRMI. [Online]. Available: [https://www.irmi.com/articles/expert-](https://www.irmi.com/articles/expert-commentary/the-shackleton-approach-effective-leadership-throughout-the-claims-process)
- [commentary/the-shackleton-approach-effective-leadership-throughout-the-claims-process](https://www.irmi.com/articles/expert-commentary/the-shackleton-approach-effective-leadership-throughout-the-claims-process). Accessed on: May 21, 2025.
- [16] Leadership in Crisis: Ernest Shackleton and the Epic Voyage of the Endurance-Case-Faculty & Research-Harvard Business School. [Online]. Available: [https://www.hbs.edu/fac-](https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=29815)
- [ulty/Pages/item.aspx?num=29815](https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=29815). Accessed on: June 03, 2025.
- [17] Sir Ernest Shackleton, Endurance Voyage Timeline and Map - Cool Antarctica. [Online]. Available: [https://www.coolantarctica.com/Antarc-](https://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/History/Ernest_Shackleton_map_time_line.php)
- [tica%20fact%20file/History/Ernest Shackle-](https://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/History/Ernest_Shackleton_map_time_line.php)
- [ton_map_time_line.php](https://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/History/Ernest_Shackleton_map_time_line.php). Accessed on: June 03, 2025.
- [18] Nourishing food, clean air and exercise: medical debates over environment and polar hygiene on Robert Falcon Scott's British National Antarctic expedition, 1901–1904. [Online]. Available: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/arti-](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11655163/)
- [cles/PMC11655163/](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11655163/). Accessed on: June 15, 2025.
- [19] *Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use*, ISO 45001:2018, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2018.
- [20] Parikka K. OHS Management Principles of ISO 45001. [Online]. Available: [https://blog.fal-](https://blog.falcony.io/en/ohs-management-principles-of-iso-45001)
- [cony.io/en/ohs-management-principles-of-iso-45001](https://blog.falcony.io/en/ohs-management-principles-of-iso-45001). Accessed on: June 15, 2025.
- [21] Hammar M. ISO 45001 management of change explained. [Online]. Available: [https://advis-](https://advisera.com/45001academy/blog/2019/11/14/iso-45001-management-of-change-explained/)
- [era.com/45001academy/blog/2019/11/14/iso-45001-](https://advisera.com/45001academy/blog/2019/11/14/iso-45001-management-of-change-explained/)
- [management-of-change-explained/](https://advisera.com/45001academy/blog/2019/11/14/iso-45001-management-of-change-explained/). Accessed on: June 10, 2025.
- [22] ISO 45001 Clause 6.1.2.1 Hazard Identification. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=7FTV_](https://www.youtube.com/watch?v=7FTV_MXI0Dc)
- [MXI0Dc](https://www.youtube.com/watch?v=7FTV_MXI0Dc). Accessed on: May 30, 2025.
- [23] Deconstructing moral leadership: lessons from endurance in Antarctica – strategica conference. [Online]. Available: [https://strategica-conference.ro/wp-con-](https://strategica-conference.ro/wp-content/uploads/2022/05/12-1.pdf)
- [tent/uploads/2022/05/12-1.pdf](https://strategica-conference.ro/wp-content/uploads/2022/05/12-1.pdf). Accessed on: July 05, 2025.
- [24] Shackleton's legendary open boat voyage- the re-enactment – Sail-World.com. [Online]. Available: <https://www.sail-world.com/-97694/>. Accessed on: July 10, 2025.

Стаття надійшла 10.11.2025

Стаття прийнята 29.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Аналіз причин та особливості керування ризиками у надзвичайних ситуаціях / Цопа В. А., Чеберячко С. І., Дерюгін О. В., Шароватова О. П. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 174-185. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351112>.

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.018.7

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351119

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН З
ВРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Бурлаченко Д.А.	ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3749-4908 , e-mail: capt.d.burlachenko@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 ;
Пастернак О.Я.	ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5174-3371 , e-mail: kptransit@ukr.net ;
Пуляєв І.О.	ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0592-032X , e-mail: pulio@ukr.net ;
Чеча О.П.	ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7155-6143 , e-mail: alexander.checha1945@gmail.com

У даній статті представлено комплексний підхід до прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна в умовах високої невизначеності, деградації технічних систем і змінних умов середовища. Традиційні методи управління ризиком виявляються недостатньо ефективними у ситуаціях, коли відсутній постійний контроль з боку оператора, тому в статті запропоновано динамічну адаптивну модель, що враховує як внутрішні (технічні та поведінкові) фактори, так і зовнішні навантаження (погодні умови, щільність руху, інформаційні збої). Основу моделі становить інтегрований індекс ризику (SIRI), який синтезує вплив деградації безпекових бар'єрів, ймовірність збоїв підсистем, поведінкові відхилення екіпажу (у разі часткової автономії), а також невизначеність у вхідних даних. Для оцінки майбутніх станів системи застосовано методи глибинного навчання, зокрема LSTM-архітектури, що дозволяють аналізувати часову динаміку ризику. Модифікатори поведінки екіпажу вводяться у вигляді коефіцієнтів впливу на ефективність бар'єрів, що дозволяє імітувати сценарії втоми, неувважності або помилок оператора. Представлена модель включає експоненційні функції деградації, ймовірнісні розподіли невизначеності та рекурентні схеми прогнозування і запропоновано верифікацію на прикладах чисельного експерименту, де порівнюються базові, стресові та комбіновані сценарії, включаючи каскадні відмови, втрату контролю та зовнішні збурення. Отримані результати засвідчили здатність системи своєчасно виявляти загрозливі тренди зростання ризику та прогнозувати час досягнення критичних порогів, що підкреслює перспективи впровадження запропонованої моделі у адаптивні системи управління автономними суднами.

Ключові слова: автономне судноплавство, експлуатаційний ризик, морський транспорт, системи судна, індекс ризику, електронна навігація, адаптивне управління, прогнозування ризику, поведінка екіпажу, морське середовище, критичні сценарії, ситуаційна обізнаність, багатофакторна оцінка, відмова підсистем, симуляція аварій, невизначеність, ризик-орієнтоване управління, судові операції, навігаційна безпека, система підтримки рішень, інтелектуальні навігаційні системи, інфраструктура порту, транспортна безпека, вплив людського фактору.

Актуальність дослідження	Аналіз останніх досліджень та публікацій
З поступовим переходом до автономного судноплавства системи управління ризиками повинні також трансформуватися з реактивних у прогностично-адаптивні, які спроможні передбачати небезпеки ще до їхнього прояву. На відміну від конвенційних суден, де ключові рішення приймаються капітаном, автономні судна (MASS) покладаються на алгоритмічні моделі, здатні інтегрувати дані з множинних джерел в реальному часі, що породжує нові виклики: зокрема, невизначеність поведінки об'єктів навколо судна, системна деградація технічних компонентів, коливання зовнішнього середовища та необхідність динамічної оцінки стійкості всіх систем управління автономним судном.	У сучасних дослідженнях автономного судноплавства значна увага приділяється побудові моделей прогнозування ризиків, здатних функціонувати в умовах багатовимірної невизначеності. Робота Song et al. [1] є прикладом моделювання поведінки автономних суден з урахуванням людоподібної навігації та прийняття рішень, що дозволяє наблизити дії автономних платформ до очікувань інших учасників руху. Аналіз зіткнень у контексті автономних систем за допомогою комбінованих моделей FTA-FBN, як у [2], демонструє можливості ієрархічного моделювання складних ризиків.

Проблеми обмежених водних просторів вирішуються шляхом застосування нелінійного предиктивного керування [3] та багатомасштабної оцінки ризику на основі імовірнісних моделей траєкторій [4], що дозволяє адаптувати управління до змін середовища. Особливої уваги заслуговує підхід constraint-adaptive MPC з вбудованими бар'єрними функціями [5], що враховує як технічні обмеження судна, так і рівень ризику.

Інтеграція даних з AIS та LiDAR [6] забезпечує багатоканальну обробку інформації для точного виявлення цілей, що є основою для побудови надійної ситуаційної обізнаності. У [7, 8] розглядаються алгоритми автоматичного швартування з урахуванням розподілу навантаження на рушії та часової залежності ризиків – важливий аспект стійкості при маневруванні. Побудова динамічних байєсівських мереж [9] дозволяє адаптивно оновлювати оцінку навігаційних ризиків у реальному часі. Додатковий виклик становлять погодні умови, як показано в [10], де досліджено виявлення об'єктів в умовах зниженого огляду, що критично для автономних систем. Сфера малотоннажного судноплавства розглядається у [11], де ризики оцінюються на рівні експлуатаційного управління. Комбінація підходів у [12] дозволяє моделювати сценарії аварійного відшвартування. Інші вітчизняні дослідження [13-16] закладають основу для формування локалізованих моделей оцінки ризику, враховуючи людський фактор, сучасні системи курсовказання та фізичну безпеку суден.

Попри значне просування у застосуванні передових методів прогнозування, таких як моделі предиктивного управління (MPC) з ризик-адаптацією, динамічні байєсівські мережі (DBN), ймовірнісне сценарне моделювання або Gaussian Process Regression, існуючі підходи переважно зосереджені на локальних аспектах безпеки: алгоритмами уникнення зіткнень, інтервалами прогнозу з урахуванням невизначеності траєкторій та реакцією на критичні події в реальному часі. Проте в них бракує інтегративного індексу, що охоплював би не лише технічні й навігаційні параметри, але й поведінкові, когнітивні та зовнішньо-середовищні фактори в єдиному адаптивному прогнозному середовищі. Саме цю прогалину має на меті заповнити розроблена в статті модель на базі інтегрованого індексу ризику SIRI, яка забезпечує комплексну оцінку поточного стану об'єкта та здатна прогнозувати динаміку розвитку ризиків з урахуванням деградації систем і впливу людського чинника.

Постановка проблеми

Сучасні автономні судна функціонують у надзвичайно складному, динамічному середовищі, що постійно змінюється і насичене невизначеністю як у технічних параметрах, так і в зовнішніх умовах (погодні зміни, поведінка інших суден, навігаційні загрози).

При цьому відсутність безпосереднього людського втручання вимагає абсолютно нових підходів до оцінки та прогнозування ризиків. Існуючі методи оцінки ризику часто не враховують часову еволюцію деградації підсистем, колективний ефект поведінки інших об'єктів та мінливість стану та ступінь стійкості судових систем до навантажень, що обмежує здатність до проактивного управління ризиком і є критично важливим у контексті розвитку автономного судноплавства.

Мета статті

Метою дослідження є створення динамічної математичної моделі прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна, яка здатна відображати часову деградацію елементів безпеки, враховувати високий рівень невизначеності у внутрішніх і зовнішніх параметрах середовища, а також забезпечувати оцінку змінної системної стійкості судна до зовнішніх загроз. Окрема увага приділяється інтеграції багатфакторної інформації в єдиний адаптивний індикатор – індекс ризику, який може бути використаний для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу

Автономне надводне судно (MASS) – це кіберфізична система з динамічним ступенем самостійності, яка оперує в межах заданих навігаційних сценаріїв та переметрів і здатна до прийняття рішень і адаптації до поточних умов без прямої участі оператора і яка включає в себе елементи безпеки, ергатики і інформаційно-комунікаційні технології.

Для комплексного дослідження автономного надводного судна (MASS) вихідною точкою є конвенційне судно, яке слугує базовою моделлю і яке містить повний набір функціональних систем і підсистем із правил, регламентованих міжнародними нормами (SOLAS, COLREG, MARPOL тощо). Саме власне на базі аналізу традиційної судової архітектури та системного підходу до її автоматизації став можливий подальший розвиток рівня автономізації – починаючи від допоміжного контролю до абсолютно автономного судна без екіпажу.

Узагальнена структура класів автономності суден згідно з класифікацією IMO (MSC.1/Circ.1640), яка є найбільш визнаною на міжнародному рівні, представлена в таблиці 1.

Кожен рівень передбачає зростання складності ергатичної взаємодії. У деяких класифікаціях (наприклад, DNV або Lloyd's Register) можуть бути додаткові підрівні або альтернативні терміни: *Smart Ship*, *Unmanned Vessel*, *Cyber-Physical Ship*. В контексті даного дослідження доцільно розглядати конвенційне судно як базову модель, від якої відштовхується автономізація.

Таблиця 1

Класи автономності суден (MASS)			
Рівень	Назва	Опис	Приклад
Level 0	Неавтономне	Повністю керується екіпажем, який перебуває на борту судна	Звичайне конвенційне торговельне судно
Level 1	Автоматизоване	Судно має автоматизовані системи, але екіпаж контролює всі функції	Судно з системами навігації ECDIS, РЛС, автопілотом
Level 2	Дистанційно кероване з екіпажем	Судно керується з берега, але екіпаж присутній на борту	Судно з системами берегового дублювання і управління
Level 3	Дистанційно кероване без екіпажу	Судно повністю керується з берега, екіпаж на борту відсутній	Безекіпажне судно з оператором на березі
Level 4	Повністю автономне	Судно приймає рішення самостійно, без участі людини	Судно з AI-навігацією, автономним маршрутом

У процесі оцінювання ризиків для морських суден важливо виділити основні групи параметрів, що визначають загальний рівень надійності та безпеки їх експлуатації. Така системна класифікація дозволяє деталізувати природу потенційних загроз, забезпечити цілісний підхід до аналізу й розроблення ефективних механізмів управління ризиками. Опис системної ідентифікації факторів ризику передбачає структурований підхід до виділення ключових груп параметрів, що впливають на надійність та безпеку суднових операцій. На першому етапі аналізу всі ризики були розподілені на чотири основні групи:

- технічні параметри судна, які включають оцінку функціонального стану основних елементів суднової системи, зокрема енергетичних установок, навігаційного обладнання, а також обчислювальних і керуючих модулів. Від справності цих компонентів залежить здатність судна виконувати основні функції в штатному та аварійному режимах;
- параметри зовнішнього середовища, які охоплюють такі фактори, як погодні умови (вітер,

хвилювання, видимість), інтенсивність судноплавного трафіку, гідрологічні й географічні особливості району плавання. Такі параметри можуть як прямо, так і опосередковано підвищувати рівень експлуатаційного ризику;

- функціональні взаємозв'язки підсистем, які характеризують імовірність каскадної деградації у разі порушення зв'язків між підсистемами (наприклад, відмова однієї підсистеми може спричинити збої в інших через функціональні залежності);

- невизначеність інформаційних джерел, яка пов'язана з якістю даних, що надходять від сенсорів та зовнішніх систем, зокрема можливістю появи шуму, затримками у передачі сигналу, а також неповнотою або розбіжностями у вхідній інформації. Такий розподіл дозволяє цілісно аналізувати ризики, враховуючи як технічні, так і організаційні й інформаційні аспекти функціонування суднової системи, Рис. 1.

Зведена структура основних груп факторів ризику наведена у Таблиці 2.



Рис. 1 – Ключові групи параметрів впливу на надійність та безпеку суднових операцій

Таблиця 2

Основні групи факторів ризику для суднових операцій

Група факторів	Характеристика/приклади
Технічні параметри судна	Стан енергетичних установок, навігаційного обладнання, обчислювальних і керуючих модулів
Параметри зовнішнього середовища	Метеоумови, видимість, хвилювання, трафік, гідрологічні/географічні перешкоди
Функціональні взаємозв'язки підсистем	Імовірність каскадної деградації, взаємозалежність та взаємовплив підсистем
Невизначеність інформаційних джерел	Шум, затримки передачі, неповнота чи некоректність даних від сенсорів і систем

Представлена класифікація створює основу для цілісного ризик-аналізу та дозволяє визначити критичні області, які вимагають особливої уваги при плануванні експлуатації або модернізації суднових систем. Розподіл ризиків за цими чотирма напрямками підвищує точність і результативність подальших заходів щодо підвищення надійності, сприяє формуванню адресних програм моніторингу та вдосконалення процедур управління як на рівні окремих підсистем, так і всієї суднової інфраструктури загалом.

На рисунку 2 подано концептуальну модель взаємозв'язків між основними групами факторів ризику, що впливають на загальну безпеку та надійність

систем управління автономним судном, де відображено, як технічні параметри судна, параметри зовнішнього середовища, функціональні взаємозв'язки підсистем і інформаційна невизначеність формують комплексну структуру ризиків та визначають рівень експлуатаційної безпеки.

Зокрема, показано, як сильні, так і слабші впливи окремих факторів, а також їхній взаємозв'язок із навігаційним станом судна, автоматизацією та іншими характеристиками дозволяє ідентифікувати критичні зони та встановити пріоритети для підвищення надійності функціонування суднових систем.



Рис. 2 – Концептуальна модель взаємозв'язків між основними групами факторів ризику

Методологія побудови моделі прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна (АМС)

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні системного підходу до аналізу факторів ризику, формалізації процесів деградації технічних бар'єрів, застосування рекурентного прогнозування на основі LSTM-мереж (Long Short-Term Memory), тобто особливого типу рекурентної нейронної мережі (RNN), яка здатна запам'ятовувати інформацію на довгі проміжки часу, а також адаптивної інтеграції невизначеності в структуру управлінських рішень. Нижче представлено ключові етапи моделі.

1. Системна ідентифікація факторів ризику. На початковому етапі було здійснено декомпозицію ризиків на чотири основні групи параметрів, представлених у Таблиці 1. Всі ці параметри формалізуються у вигляді вектора стану системи:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)], \quad (1)$$

та вектора випадкових збурень або зовнішніх впливів:

$$\mathbf{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)], \quad (2)$$

які є вхідними змінними для прогновної моделі ризику.

2. Моделювання деградації бар'єрів безпеки. Кожна критична підсистема безпеки моделюється як бар'єр $B_j(t)$, ефективність якого змінюється в часі згідно із законом експоненційного згасання:

$$B_j(t) = B_j^0 \cdot e^{-\lambda_j t}, \quad (3)$$

де: B_j^0 – початковий рівень ефективності (в нормальних умовах), λ_j – індивідуальний коефіцієнт деградації, що залежить від надійності елементу, t – поточний момент часу.

Такий формалізований підхід дозволяє оцінювати накопичення деградації у ключових компонентах судна, що є основою для розрахунку зміни ризику.

3. Динамічне прогнозування інтегрованого ризику. На основі часових рядів параметрів $\mathbf{X}(t)$ та збурень $\mathbf{U}(t)$ будується модель прогнозування інтегрованого ризику із застосуванням нейронної мережі з довготривалою пам'яттю (LSTM). Прогнозована величина ризику в майбутній момент часу $t + \tau$ обчислюється як:

$$R(t + \tau) = f_{LSTM}(\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t)). \quad (4)$$

Паралельно розраховується рівень системної стійкості $RI(t)$ як відношення між наявним запасом безпеки $M(t)$ та поточним інтегрованим ризиком $S(t)$:

$$RI(t) = \frac{M(t)}{S(t)}, \quad (5)$$

де: $M(t)$ – сукупна здатність системи протистояти впливу зовнішніх загроз, $S(t)$ – інтегрований ризик, агрегований з урахуванням усіх підсистем.

4. Адаптація до невизначеності. У моделі передбачено інтеграцію параметрів, що подаються не як точкові значення, а як розподіли ймовірностей – зокрема для метеоданих, щільності руху, стану каналів зв'язку. Враховується:

- модифікація вагових коефіцієнтів:
- $$w_j(t) = w_j^0 + \Delta w_j(t);$$
- зміна пріоритетності джерел даних;
 - динамічне оновлення порогів реагування в залежності від ризик-прогнозу.

Таким чином, система зберігає адаптивність навіть за умов неповної або нечіткої інформації.

5. Сценарний аналіз та моделювання. Для верифікації моделі застосовано низку тестових сценаріїв, що імітують реальні ситуації:

- різка зміна погодних умов (штормові умови, обмежена видимість);
- вихід з ладу окремих підсистем (системи контролю, зв'язок);
- втрата взаємодії з береговим центром управління;
- поведінкові порушення екіпажу у гібридному режимі.

6. Результати оцінювались за допомогою часових графіків еволюції $R(t)$ та $RI(t)$, поверхневих карт ризику з візуалізацією зон небезпеки та ідентифікації критичних точок – моментів перетину ризиком допустимого порогу.

Отже модель базується на формалізації поточного та прогнозованого стану суднових підсистем $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ та $\mathbf{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$, де $x_i(t)$ – параметри підсистем (енергетична установка, управління рухом, системи навігації), n – кількість підсистем, $u_j(t)$ – чинники невизначеності: помилки сенсорів, екзогенні впливи, динаміка середовища.

Модель деградації бар'єрів безпеки (3) демонструє експоненційно зменшувану ефективність кожного бар'єру і показує, що захисна система (наприклад, технічний бар'єр або людська увага) з часом слабшає, тобто поступово втрачає ефективність, чим більший коефіцієнт деградації, тим швидше вона «виснажується».

Визначення ризику на основі ймовірності відмов та втрати ефективності бар'єрів:

$$P(C_j(t)) = 1 - e^{-\beta_j(1-B_j(t))\Delta t}$$

$$S(t) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P(C_j(t)), \quad (6)$$

де: $P(C_j(t))$ – ймовірність відмови підсистеми j у момент часу t ; w_j – ваговий коефіцієнт критичності j -ї підсистеми; $S(t)$ – інтегральний (агрегований) ризик для всієї системи.

Прогнозування ризику з LSTM-моделлю:

$$\hat{S}(t + \tau) = f_{\text{LSTM}}(\mathbf{X}_{t-\delta:t}, \mathbf{U}_{t-\delta:t}), \quad (7)$$

де δ – глибина вікна історії, τ – горизонт прогнозу.

Тоді індекс запасу безпеки та стійкості буде:

$$M(t) = S_{\text{crit}} - S(t)$$

$$RI(t) = \frac{M(t)}{S(t)} \cdot \eta(t), \quad (8)$$

де S_{crit} – критичний рівень ризику, $\eta(t)$ – поправка на системні резерви.

Умови реагування If $S(t) \geq S_{\text{crit}} \Rightarrow$ активувати протокол захисту, If $RI(t) < \theta \Rightarrow$ перенаправити або уповільнити, де θ – поріг стійкості.

Таким чином, запропонована математична модель враховує часову динаміку технічних параметрів разом з ступенем деградації бар'єрів безпеки, а також вплив невизначеності навколишнього середовища. Використання прогностичної складової на основі LSTM дозволяє заздалегідь оцінити та змодельовати поточний рівень ризику, а показники запасу міцності та стійкості системи слугують основою для активації захисних протоколів та адаптації стратегій управління.

У таблиці 3 представлено параметри моделі, які характеризують технічний стан, ефективність бар'єрів безпеки та часову динаміку деградаційних процесів.

Таблиця 3

Основні параметри математичної моделі прогнозування ризику для автономного судна

№	Позначення	Назва параметра	Одиниця виміру
1	$P(C_j)$	Ймовірність відмови підсистеми j	Безрозмірна
2	$EB_j(t)$	Ефективність бар'єру безпеки j в момент часу t	Безрозмірна (0-1)
3	$R_j(t)$	Поточний ризик підсистеми j	Умовні одиниці ризику
4	w_j	Ваговий коефіцієнт критичності підсистеми j	Безрозмірна
5	$S(t)$	Агрегований ризик системи у момент часу t	Умовні одиниці
6	$SIRI(t)$	Інтегрований індекс експлуатаційного ризику	Безрозмірна (0-1)
7	$M(t)$	Поточний запас безпеки	Умовні одиниці
8	T_{crit}	Прогнозований час до досягнення критичного ризику	Години
9	RI	Індекс стійкості системи	Безрозмірна (0-1)
10	λ_j	Коефіцієнт деградації бар'єру безпеки	1/год
11	t	Час експлуатації/симуляції	Години

Результати та обговорення

З метою верифікації та практичного випробування запропонованої моделі динамічного прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна було реалізовано серію чисельних експериментів. Кожен сценарій змодельовано в умовах змінного морського середовища, з урахуванням деградації технічних бар'єрів, зовнішніх впливів та поведінкових чинників. Аналіз охоплює часовий інтервал $t = 0 \dots 100$ годин з кроком 1 год, а результати подано у вигляді кривих динаміки індексу $SIRI(t)$ – інтегрального показника експлуатаційного ризику.

На рисунку 3 подано динаміку зміни індексу експлуатаційного ризику ($SIRI$) для чотирьох ключових сценаріїв упродовж 100 годин.

На графіку відображено, як різні фактори, від деградації систем до людських помилок впливають на зниження ефективності безпеки судна, демонструючи ефективність моделі для виявлення критичних моментів і застосування можливості проактивного управління безпекою автономних морських суден на основі динамічного прогнозування.

Так, базовий сценарій демонструє повільне зниження ризику, що залишається в межах безпечного рівня впродовж усього періоду, що свідчить про стабільну роботу судових систем без критичних зовнішніх втручань. Сценарій втрати живлення показує різкий спад індексу через інтенсивну деградацію енергетичних підсистем, що ілюструє вразливість судна до технічних збоїв. Зниження ризику в стресовому

середовищі помірно, проте стабільне, демонструючи вплив навколишніх умов (наприклад, шторму) на загальний рівень безпеки. Комбінований збій включає технічну деградацію та фактор екіпажу (поведінкові

помилки) і це призводить до коливань і прискореного досягнення критичної зони і є найнебезпечнішим сценарієм серед представлених.

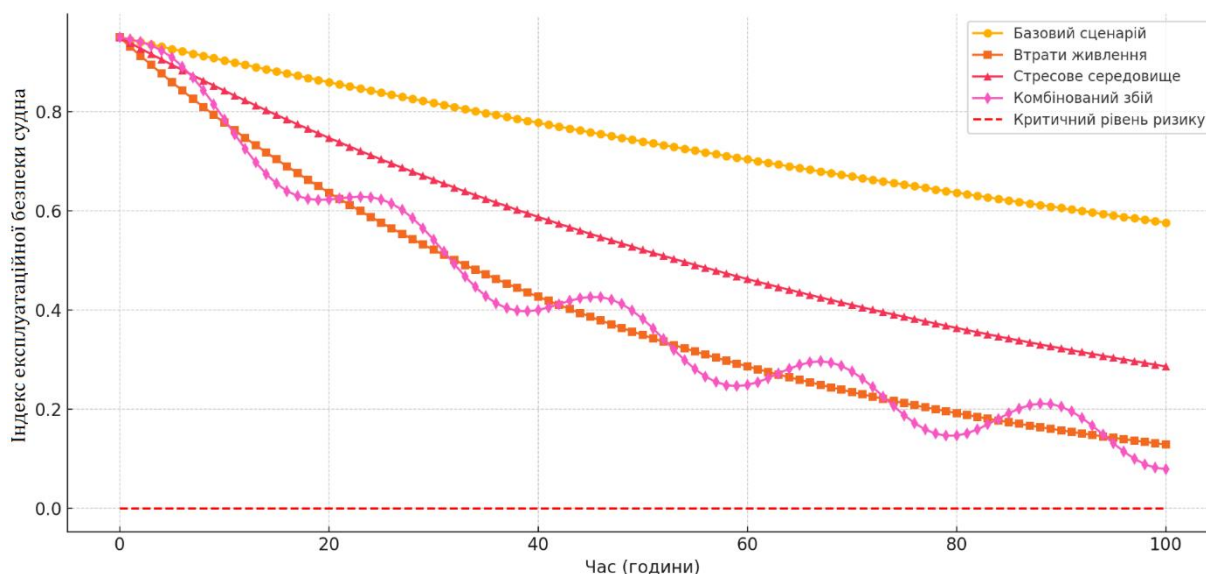


Рис. 3 – Динаміка зміни індексу експлуатаційної безпеки судна для чотирьох основних сценаріїв

На рисунку 4 подано зміну індексу експлуатаційного ризику (SIRI), який зростає з часом, що відповідає логіці прогресуючої деградації технічних систем,

зовнішньому навантаженню та впливу поведінкових факторів.

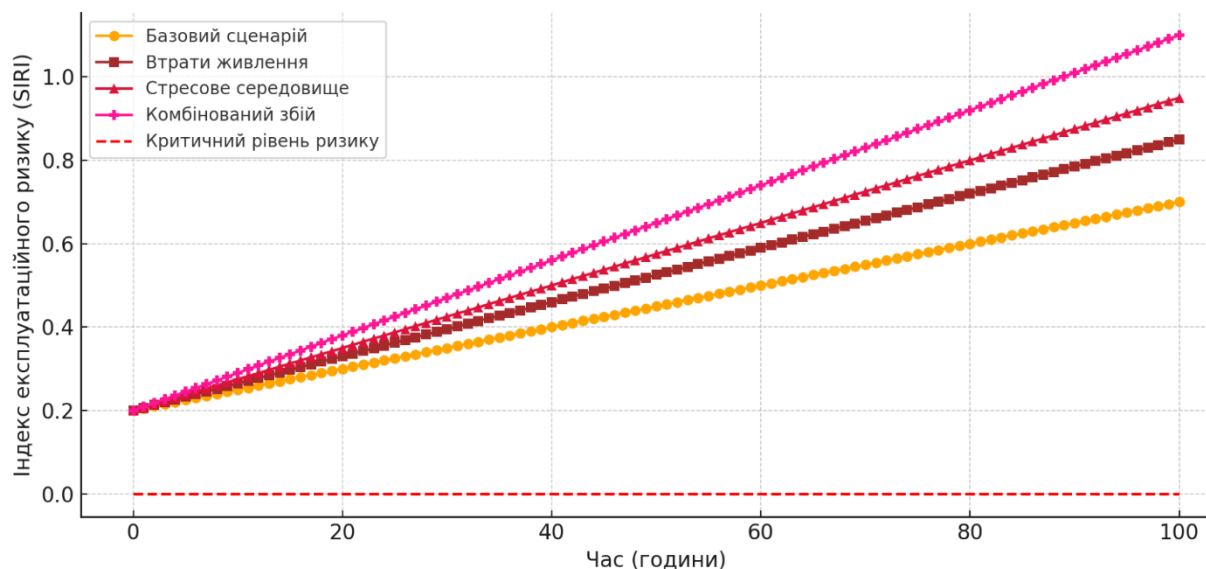


Рис. 4 – Динаміка зростання індексу ризику (SIRI) з плином часу

На графіку представлено динаміку зростання SIRI для чотирьох ключових сценаріїв протягом 100 годин, де базовий сценарій демонструє повільне накопичення ризику, тобто система залишається в межах допустимого рівня безпеки протягом тривалого часу. Втрати живлення призводять до більш інтенсивного зростання

ризиків, особливо в середньостроковій перспективі. Щодо стресового середовища (наприклад, штормові умови або навігаційні небезпеки), то воно ще більше пришвидшує динаміку зростання ризиків. Комбінований збій поєднує технічні відмови та поведінкові

чинники, що також веде до найшвидшого досягнення критичного рівня.

Схема на рисунку 5 відображає взаємозалежну структуру формування інтегрального ризику безпеки експлуатації автономного судна та його систем.

Основна ідея – це взаємозв'язок різних типів ризиків (технічні, зовнішні, оперативні/організаційні), які формують єдиний ризиковий фон, що визначає рівень безпеки експлуатації.

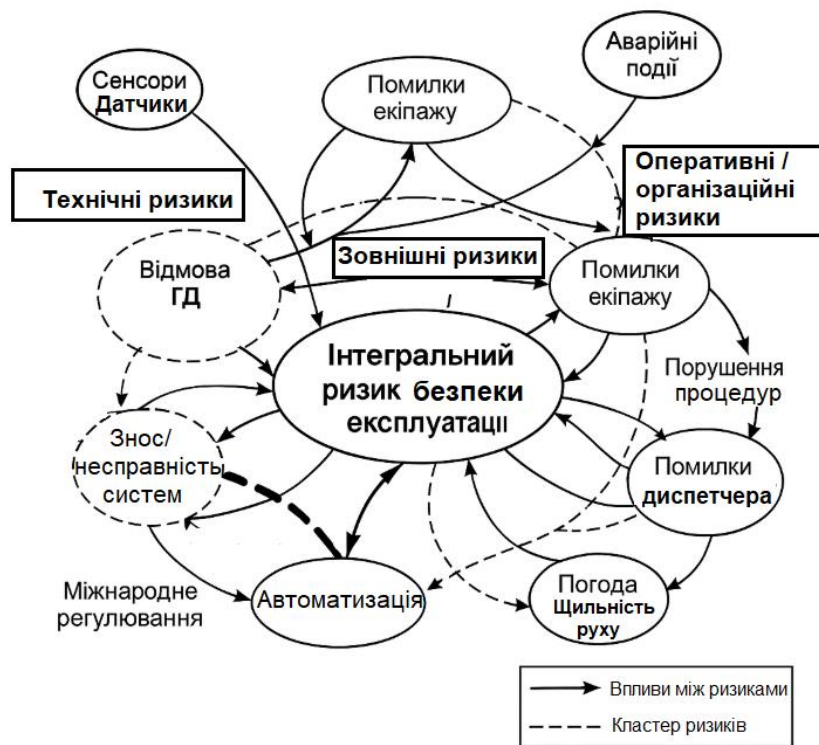


Рис. 5 – Структура формування інтегрального ризику безпеки експлуатації автономного судна

На схемі окреслено ключові кластери ризиків:

- технічні ризики: знос/несправність систем, відмова головної двигунної установки (ГД), несправності сенсорів;

- зовнішні ризики: погодні умови, інтенсивність трафіку, міжнародне регулювання;

- оперативні/організаційні ризики: помилки екіпажу, помилки диспетчера, порушення процедур, аварійні події.

Особлива увага тут приділена ролі рівня автоматизації як чинника, що може одночасно зменшувати частину ризиків, але й створювати нові (наприклад, через втрату контролю чи складність системних відмов), і представлена системна карта дає змогу чітко ідентифікувати напрямки впливу між типами ризиків (суцільна – міжкласові впливи, пунктир – зв'язки всередині кластера), а також описує, як ризики накопичуються й передаються між окремими ланками експлуатації судна, допомагаючи виявити критичні точки для моніторингу, профілактики й підвищення рівня безпеки.

У підсумку представлений графічний аналіз результатів чисельного моделювання відображає динаміку зростання експлуатаційного ризику у різних

сценаріях. Базовий сценарій підтверджує стабільність автономної суднової системи в умовах незначної деградації, коли рівень ризику зростає повільно і залишається в межах допустимого. Проте вже незначне збільшення швидкості деградації технічних бар'єрів або поява зовнішніх дестабілізуючих факторів, а саме погодні умови чи інформаційні збої, веде до значно пришвидшеного накопичення ризику.

Найбільш критичним виявився сценарій комбінованого впливу технічних збоїв і поведінкових помилок, у якому ризик зростає удвічі швидше і досягає порогу критичності значно раніше, ніж в інших випадках, що свідчить про високий ступінь взаємозалежності між підсистемами та важливість комплексного моніторингу як технічних параметрів, так і людського чинника. Представлена модель демонструє не лише здатність до раннього виявлення ризику, але й потенціал для використання як основи адаптивного управління автономним судном у реальному часі.

Висновки

У статті розроблено та обґрунтовано інтегровану динамічну модель прогнозування ризиків для автономних морських суден, яка враховує не лише технічну

деградацію систем, а й психофізіологічний стан екіпажу, параметри зовнішнього середовища та невизначеність. На основі індексу SIRI (Smart Integrated Risk Index), який служить єдиним показником рівня експлуатаційного ризику використано формалізовану експоненціальну модель деградації бар'єрів безпеки та змодельовано часову динаміку зниження їх ефективності. Враховано невизначеність інформаційних потоків, що дозволяє гнучко змінювати пороги реагування. Модель дає змогу виявляти критичні сценарії до їхнього настання, що важливо для проактивного управління ризиками в автономному судноплаванні. Запропоновано інтеграцію в інтелектуальні системи судноводіння, такі як навігаційні інтерфейси та платформи підтримки прийняття рішень (DSS). Також за можливе є застосування в реальному часі завдяки структурі, яка здатна адаптуватися до змін. Застосування моделі в симуляційному середовищі для різних типів сценаріїв експлуатації автономного судна показало її ефективність у зниженні рівня ризику та підвищенні стійкості систем управління.

Перелік використаних джерел

- [1] Enhancing collision avoidance in mixed waterborne transport: Human-mimic navigation and decision-making by autonomous vessels / Song R., Papadimitriou E., Negenborn, R. R., Van Gelder P. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 322. Article 120443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120443>.
- [2] Li P., Wang Y., Yang Z. Risk assessment of maritime autonomous surface ships collisions using an FTA-FBN model. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 309. Article 118444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118444>.
- [3] Nonlinear model predictive control for path following of autonomous inland vessels in confined waterways / C. Zhang et al. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 334. Article 121592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121592>.
- [4] Multi-scale collision risk assessment in restricted waters considering ship trajectory uncertainty / J. Du et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 265. Article 111511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111511>.
- [5] Xue H., Lai Y., Sun K. Human-like constraint-adaptive model predictive control with risk-tunable control barrier functions for autonomous ships. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 308. Article 118219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118219>.
- [6] Von Brandis A., Menges D., Rasheed A. Multi-Target Tracking for Autonomous Surface Vessels Using LiDAR and AIS Data Integration. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 154. Article 104348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104348>.
- [7] Robust sliding mode model predictive control and thrust allocation methods for autonomous berthing of water-jet propulsion unmanned surface vehicles / Qi J., Liang W., Xie W., Peng Y. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 331. Article 121280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121280>.
- [8] A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation / Luo X., Ling H., Xing M., Bai X. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 245. Article 110015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110015>.
- [9] Navigation risk assessment for ocean-going ships in the north pacific ocean based on an improved dynamic Bayesian network model / Wang Y., Qian L., Hong M., Li D. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 315. Article 119804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119804>.
- [10] Object detection for autonomous vehicles under adverse weather conditions / Z. Chen et al. *Expert Systems With Applications*. 2026. Vol. 296. Article 128994. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128994>.
- [11] An operational risk management approach for small fishing vessel / F. Obeng et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 247. Article 110104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110104>.
- [12] Toward modeling emergency unmooring of manned and autonomous ships - A combined FRAM+HFACS-MA approach / J. Nasur et al. *Safety Science*. 2024. Vol. 181. Article 106676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106676>.
- [13] 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/rd.2021.2-9.03>.
- [14] Мельник О. М., Бичковський Ю. В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства. *Вчені записки Таврійського національного університету 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>.
- [15] 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. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>.
- [16] Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна / О. М. Мельник та ін. *Комунальне господарство міст*. 2021. № 6(166). С. 204-210. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

DYNAMIC MODEL OF RISK PREDICTION FOR AUTONOMOUS VESSELS TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAINTY AND STABILITY OF CONTROL SYSTEMS

Burlachenko D.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3749-4908 , e-mail: capt.d.burlachenko@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 ;
Pasternak O.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5174-3371 , e-mail: kptransit@ukr.net ;
Pulyaev I.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0592-032X , e-mail: pulio@ukr.net ;
Checha O.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7155-6143 , e-mail: alexander.checha1945@gmail.com

This article presents a comprehensive approach to predicting the operational risk of an autonomous marine vessel under conditions of high uncertainty, degradation of technical systems and changing environmental conditions. Traditional methods of risk management are not effective enough in situations where there is no constant control by the operator, so the article proposes a dynamic adaptive model that takes into account both internal (technical and behavioral) factors and external loads (weather conditions, traffic density, information failures). The model is based on an integrated risk index (SIRI) that synthesizes the impact of degradation of safety barriers, the probability of subsystem failures, crew behavioral deviations (in the case of partial autonomy), and uncertainty in input data. Deep learning methods, including LSTM architectures, are used to estimate future system states, allowing to analyze the time dynamics of risk. Crew behavior modifiers are introduced in the form of coefficients of influence on the effectiveness of barriers, which allows simulating scenarios of fatigue, inattention, or operator errors. The presented model includes exponential degradation functions, probabilistic uncertainty distributions, and recurrent forecasting schemes, and verification is proposed using numerical experiments comparing baseline, stress, and combined scenarios, including cascading failures, loss of control, and external disturbances. The obtained results demonstrate the system's ability to timely detect threatening risk trends and predict when critical thresholds will be reached, which emphasizes the prospects for implementing the proposed model in adaptive control systems for autonomous vessels.

Keywords: autonomous shipping, operational risk, maritime transport, ship systems, risk index, electronic navigation, adaptive control, risk prediction, crew behavior, maritime environment, critical scenarios, situational awareness, multi-factorial assessment, subsystem failure, accident simulation, uncertainty, risk-based management, ship operations, navigation safety, decision support system, intelligent navigation systems, port infrastructure, transport safety, human factor impact.

References

- [1] R. Song, E. Papadimitriou, R.R. Negenborn, and P. Van Gelder, "Enhancing collision avoidance in mixed waterborne transport: Human-mimic navigation and decision-making by autonomous vessels," *Ocean Engineering*, vol. 322, article 120443, 2025. doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.120443.
- [2] P. Li, Y. Wang, and Z. Yang, "Risk assessment of maritime autonomous surface ships collisions using an FTA-FBN model," *Ocean Engineering*, vol. 309, article 118444, 2024. doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118444.
- [3] C. Zhang, A. Dhyani, J.W. Ringsberg, F. Thies, R.R. Negenborn, and V. Reppa, "Nonlinear model predictive control for path following of autonomous inland vessels in confined waterways," *Ocean Engineering*, vol. 334, article 121592, 2025. doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121592.
- [4] J. Du, J. Weng, Y. Xi, Q. Zhu, H. Ding, and K. Shi, "Multi-scale collision risk assessment in restricted waters considering ship trajectory uncertainty," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 265, article 111511, 2025. doi: 10.1016/j.ress.2025.111511.
- [5] H. Xue, Y. Lai, and K. Sun, "Human-like constraint-adaptive model predictive control with risk-tunable control barrier functions for autonomous ships," *Ocean Engineering*, vol. 308, article 118219, 2024. doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118219.
- [6] A. Von Brandis, D. Menges, and A. Rasheed, "Multi-Target Tracking for Autonomous Surface Vessels Using LiDAR and AIS Data Integration," *Applied Ocean Research*, vol. 154, article 104348, 2024. doi: 10.1016/j.apor.2024.104348.
- [7] J. Qi, W. Liang, W. Xie, and Y. Peng, "Robust sliding mode model predictive control and thrust allocation methods for autonomous berthing of water-jet propulsion unmanned surface vehicles," *Ocean Engineering*, vol. 331, article 121280, 2025. doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121280.
- [8] X. Luo, H. Ling, M. Xing, and X. Bai, "A dynamic-static combination risk analysis framework for

- berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 245, article 110015, 2024. doi: **10.1016/j.res.2024.110015**.
- [9] Y. Wang, L. Qian, M. Hong, and D. Li, “Navigation risk assessment for ocean-going ships in the north pacific ocean based on an improved dynamic Bayesian network model,” *Ocean Engineering*, vol. 315, article 119804, 2024. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119804**.
- [10] Z. Chen et al., “Object detection for autonomous vehicles under adverse weather conditions,” *Expert Systems With Applications*, vol. 296, article 128994, 2026. doi: **10.1016/j.eswa.2025.128994**.
- [11] F. Obeng, D. Domeh, F. Khan, N. Bose, and E. Sanli, “An operational risk management approach for small fishing vessel,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 247, article 110104, 2024. doi: **10.1016/j.res.2024.110104**.
- [12] J. Nasur, K. Bogusławski, P. Wolska, M. Gil, and K. Wróbel, “Toward modeling emergency unmooring of manned and autonomous ships - A combined FRAM+HFACS-MA approach,” *Safety Science*, vol. 181, article 106676, 2024. doi: **10.1016/j.ssci.2024.106676**.
- [13] O.M. Melnyk, and Y.V. Bychkovskyi, “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*, vol. 2(9), pp. 37-46, 2021. doi: **10.33082/td.2021.2-9.03**.
- [14] O.M. Melnyk, and Y.V. Bychkovskyi, “Vrakhuvannia faktoru stresu u systemi zabezpechennia bezpeky moreplavstva” [“Stress factor in the system of the shipping safety”], *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: 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**.
- [15] O.M. Melnyk, O.V. Shcherbyna, K.S. Koryakin, and D.A. Burlachenko, “Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskyykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky” [“Review and prospects for using modern heading systems on sea-going ships to ensure navigational safety”], *Naukovi visti Dalivskoho universytetu – Scientific News of Daliv University*, vol. 21, 2021. doi: **10.33216/2222-3428-2021-21**.
- [16] O.M. Melnyk, S.P. Onyshchenko, O.V. Loginov, V.I. Okulov, and I.O. Puliayev, “Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna” [“Actual problems of maritime safety and modern ways of ensuring the ship security”], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal Economy of Cities*, vol. 6(166), pp. 204-210, 2021. doi: **10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210**.

Стаття надійшла 02.08.2025

Стаття прийнята 11.08.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Динамічна модель прогнозування ризику для автономних суден з врахуванням невідомості та стійкості систем управління / Д. А. Бурлаченко та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 186-196. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351119>.

УДК 629.5.015:519.876.5

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351125

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАНЕВРУВАННЯ СУДЕН

Лесневський В.М.	здобувач ступеня доктора філософії, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4195-5678 , e-mail: vlad.lesnevskiy@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 виконано комплексний огляд і систематизацію сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден. Проаналізовано класичні орієнтовані на модель параметричні підходи, засновані на використанні математичних моделей типу Nomoto та MMG у поєднанні з методами найменших квадратів і фільтрами Калмана, а також рекурсивні й онлайн-алгоритми, орієнтовані на адаптацію параметрів у реальному часі. Особливу увагу приділено нелінійним, інноваційним і орієнтованим на дані методам, зокрема підходам на основі регресії опорних векторів, регресії гаусівського процесу та нейронних мереж, які дозволяють враховувати складні нелінійні ефекти та змінні умови експлуатації. Проведено класифікацію розглянутих методів за типами математичних моделей, алгоритмами ідентифікації, джерелами вихідних даних і рівнем придатності для використання в системах управління рухом суден. Показано, що традиційні орієнтовані на модель підходи характеризуються фізичною інтерпретованістю параметрів, проте мають обмежену точність і адаптивність у реальних умовах плавання. Сучасні орієнтовані на дані та інтелектуальні методи, навпаки, забезпечують підвищену точність і здатність до адаптації, однак супроводжуються зростанням обчислювальної складності та проблемами інтерпретованості результатів. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність розвитку гібридних (grey-box) підходів, які поєднують фізично обґрунтовані математичні моделі з адаптивними орієнтованими на дані алгоритмами. Зазначено, що такі підходи є перспективними для інтеграції в системи підтримки прийняття рішень, цифрові двійники суден та інтелектуальні навігаційні комплекси. Отримані результати створюють наукові передумови для подальших досліджень, спрямованих на розроблення адаптивних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з використанням експлуатаційних навігаційних даних та підвищення ефективності управління рухом у реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: маневрування суден, динамічні характеристики, ідентифікація параметрів, управління рухом судна, математичне моделювання, адаптивні методи, підходи орієнтовані на дані, гібридні моделі.

Постановка проблеми

Ефективність управління рухом судна значною мірою визначається точністю врахування його динамічних характеристик під час маневрування, зокрема параметрів курсової стійкості, маневреності та керованості. В умовах зростання інтенсивності судноплавства, ускладнення навігаційної обстановки та розширення застосування автоматизованих і інтелектуальних навігаційних систем вимоги до достовірності інформації про динаміку руху судна істотно зростають.

На практиці процес управління рухом судна часто ґрунтується на заздалегідь визначених або спрощених параметрах маневреності, отриманих за результатами натурних випробувань або аналітичних розрахунків. Проте такі параметри не завжди адекватно відображають реальний динамічний стан судна в умовах змінного завантаження, впливу гідрометеорологічних факторів, обмежених акваторій та зносу елементів рушійно-кермового комплексу. Це призводить до зниження точності прогнозування траєкторії руху та, як наслідок, до зростання ризику навігаційних помилок.

Сучасні методи ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден характеризуються значною різноманітністю підходів – від класичних

модельно-орієнтованих до орієнтованих на дані та інтелектуальних. Водночас більшість із них має обмежену адаптивність або потребує спеціально організованих маневрових експериментів, що ускладнює їх практичне застосування у процесі повсякденної експлуатації суден. Недостатньо вирішеним залишається питання забезпечення балансу між точністю ідентифікації, обчислювальною складністю алгоритмів та можливістю їх інтеграції у системи управління рухом у реальному часі.

У зв'язку з цим актуальною науково-прикладною задачею є обґрунтування та розвиток підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден, які б забезпечували підвищення ефективності процесу управління рухом за рахунок використання експлуатаційних навігаційних даних та адаптації до реальних умов плавання. Вирішення цієї задачі є важливим для підвищення безпеки судноплавства, зменшення навігаційних ризиків та створення передумов для впровадження сучасних інтелектуальних систем управління рухом суден.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден є предметом активних наукових досліджень упродовж останніх десятиліть, що зумовлено підвищеними вимогами до точності управління рухом суден у складних навігаційних умовах, а також розвитком автоматизованих і інтелектуальних систем судноводіння. Аналіз сучасних публікацій свідчить про поступовий перехід від класичних параметричних методів ідентифікації до адаптивних, нелінійних та орієнтованих на дані підходів.

Традиційні орієнтовані на модель методи ідентифікації, засновані на лінійних або квазілінійних математичних моделях руху судна, зокрема моделях Nomoto та MMG, широко використовуються для визначення гідродинамічних коефіцієнтів і параметрів керованості. Для їх реалізації застосовуються методи найменших квадратів, рекурсивні алгоритми та фільтри Калмана, що дозволяє оцінювати параметри руху на основі експериментальних або експлуатаційних даних. Водночас дослідження показують обмежену точність таких підходів у разі наявності нелінійних ефектів, шумів навігаційних вимірювань та змінних умов експлуатації [1-3].

З метою підвищення адаптивності ідентифікації у реальному часі значного розвитку набули рекурсивні та онлайн-методи, що передбачають використання факторів забування, адаптивних фільтрів та оновлення параметрів на основі поточних навігаційних даних. У низці робіт показано, що такі підходи дозволяють підвищити точність прогнозування траєкторії руху судна за умов змінних гідрометеорологічних впливів, однак вони залишаються чутливими до накопичення похибок та дрейфу параметрів [4-6].

Подальший розвиток отримали нелінійні та інноваційні методи ідентифікації, спрямовані на врахування складних динамічних зв'язків між керуючими впливами та реакцією судна. Запропоновані алгоритми інноваційних найменших квадратів і нелінійні методи підтримуючих векторних машин демонструють покращену збіжність і стійкість до шумів порівняно з класичними методами, проте супроводжуються зростанням обчислювальної складності [7-9].

Суттєвий інтерес у сучасних дослідженнях викликають орієнтовані на дані методи, зокрема підходи на основі support vector regression, Gaussian process regression та нейронних мереж. Показано, що непараметричні моделі дозволяють ефективно описувати нелінійну динаміку маневрування суден та забезпечують високу точність ідентифікації навіть за обмежених обсягів навчальних вибірок [10-12]. Особливу увагу приділено Gaussian process regression, яка, окрім прогнозування, забезпечує оцінювання невизначеності результатів, що є важливим для систем підтримки прийняття рішень [13, 14].

Разом з тим, застосування методів машинного та глибинного навчання, зокрема LSTM та ансамблевих

нейронних мереж, супроводжується проблемами інтерпретованості результатів і потребує значних обсягів якісних даних для навчання моделей, що обмежує їх пряме використання в задачах управління рухом у реальному часі [15, 16].

Перспективним напрямом розвитку вважаються гібридні (grey-box) підходи, що поєднують фізично обґрунтовані математичні моделі руху судна з орієнтованими на дані калібраторами та адаптивними алгоритмами корекції параметрів. Дослідження підтверджують, що такі підходи дозволяють досягти балансу між точністю ідентифікації, фізичною інтерпретованістю параметрів та можливістю інтеграції результатів у системи управління рухом і автономного судноводіння [17-19].

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про відсутність універсального методу ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден, здатного одночасно забезпечити високу точність, адаптивність і простоту практичної реалізації. Це обумовлює актуальність подальших досліджень, спрямованих на розроблення методів, орієнтованих на використання експлуатаційних навігаційних даних та інтеграцію результатів ідентифікації у процес управління рухом судна.

Для забезпечення репрезентативності та зменшення суб'єктивності огляду було застосовано цілеспрямований відбір наукових публікацій за тематикою ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден. Пошук джерел здійснювався у міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect) та фахових журналах морського профілю за ключовими словами ship maneuvering, parameter identification, system identification, data-driven ship dynamics, Gaussian process, support vector regression, online identification.

До огляду включалися публікації, що:

- (i) безпосередньо стосуються ідентифікації параметрів маневрування суден або моделей руху;
- (ii) містять формалізований метод ідентифікації;
- (iii) опубліковані переважно у період з 2008 по 2025 рр.

Роботи, орієнтовані виключно на задачі керування без аналізу процесу ідентифікації параметрів, до огляду не включалися. Такий підхід дозволив сформувати збалансований корпус літератури та зменшити ризик зміщення вибірки.

Мета статті

Мета статті полягає в аналізі та систематизації сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з позицій їх впливу на ефективність процесу управління рухом, а також в обґрунтуванні доцільності підвищення точності й адаптивності методів ідентифікації для використання в реальних умовах експлуатації суден.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є методи ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден у задачах управління рухом. Предметом дослідження виступають підходи та алгоритми ідентифікації параметрів руху судна з точки зору їх точності, адаптивності та практичної придатності для використання в реальних умовах експлуатації.

Матеріалами дослідження слугували наукові публікації у фахових журналах і матеріалах міжнародних конференцій, присвячені орієнтованим на дані, модельно-орієнтованим і гібридним методам ідентифікації. У роботі застосовано методи аналітичного та порівняльного аналізу, систематизації й узагальнення, а також формалізоване порівняння методів за ключовими критеріями ефективності з використанням шкали оцінювання 0 / + / ++.

Виклад основного матеріалу

Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що проблема ідентифікації динамічних характеристик

маневрування суден розглядається з різних методологічних позицій, що зумовлено складністю фізичних процесів руху судна та різноманіттям умов його експлуатації. Існуючі підходи відрізняються як за рівнем формалізації математичних моделей, так і за типами використовуваних експериментальних і навігаційних даних, що ускладнює їх безпосереднє порівняння та практичний вибір для задач управління рухом. У наукових дослідженнях застосовуються класичні параметричні орієнтовані на модель методи, рекурсивні та онлайн-алгоритми ідентифікації, нелінійні й інноваційні методи, а також сучасні орієнтовані на дані підходи на основі машинного навчання та штучного інтелекту. Окремий напрям становлять гібридні (grey-box) моделі, що поєднують фізично обґрунтовані рівняння руху судна з адаптивними алгоритмами корекції параметрів на основі експлуатаційних даних. Кожен із зазначених підходів (табл. 1) має власні переваги та обмеження щодо точності ідентифікації, обчислювальної складності, стійкості до навігаційних шумів і можливості інтеграції в системи підтримки прийняття рішень.

Таблиця 1

Класифікація сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден

Клас методів	Основні представники	Вихідні дані	Переваги	Обмеження	Застосовність для управління рухом	Джерело
Класичні параметричні орієнтовані на модель методи	LS, RLS, EKF, UKF; Nomoto, MMG	Натурні маневрові випробування	Фізична інтерпретованість; простота	Чутливість до шумів; низька адаптивність	Обмежена, переважно offline	[1]
Рекурсивні та онлайн-методи ідентифікації	RLS з фактором забування, adaptive EKF	AIS, GNSS, курсові дані	Адаптація в реальному часі	Дрейф параметрів; нестійкість	Висока	[4]
Нелінійні та інноваційні методи	Multi-innovation LS, NLSSVM	Комбіновані дані	Швидка збіжність; підвищена точність	Обчислювальна складність	Середня–висока	[7]
Методи на основі Support Vector Machines	SVR, LS-SVR, ϵ -SVR, AWLS-SVR	Експлуатаційні траєкторні дані	Робастність; точність	Складність налаштування; слабка інтерпретація	Висока	[10]
Gaussian Process Regression (GPR)	GPR, sparse GPR, multi-output GPR	Обмежені навігаційні вибірки	Оцінка невізначеності; ефективність при малих даних	Обчислювальні витрати	Висока	[11]
Нейронні мережі та глибинне навчання	LSTM, RBF, FNN, ensemble learning	Великі масиви даних	Моделювання нелінійностей	«Чорна скринька»	Висока, з обмеженнями	[15]
Гібридні (grey-box) підходи	Physics-informed ML + Nomoto/MMG	Моделі + експлуатаційні дані	Баланс точності й інтерпретації	Складність реалізації	Дуже висока	[18]
Інтелектуальні адаптивні ансамблеві методи	Ensemble learning, adaptive weighting	Дані різних режимів руху	Робастність до змін умов	Підвищена складність	Перспективна	[20]

З огляду на це виникає необхідність систематизації існуючих методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з урахуванням їх методологічних особливостей, типів вхідних даних та рівня придатності для задач управління рухом у реальних умовах експлуатації. Така систематизація дозволяє не лише узагальнити сучасний стан наукових досліджень у даній галузі, але й окреслити перспективні напрями подальшого розвитку методів ідентифікації.

З урахуванням наведеного в роботі сформовано узагальнену класифікацію сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден, яку наведено у табл. 1. Класифікація базується на аналізі типів математичних моделей, використовуваних алгоритмів ідентифікації, джерел вихідних даних та можливостей практичного застосування отриманих результатів у процесі управління рухом судна.

У межах даного огляду під «класом методів» розуміється узагальнене сімейство підходів, об'єднаних спільною методологічною ідеєю і принципами ідентифікації, а не конкретний алгоритм. Зокрема, методи на основі support vector regression та Gaussian process regression розглядаються як окремі класи через відмінність їх математичної природи та можливостей оцінювання невизначеності, тоді як ансамблеві та адаптивні інтелектуальні підходи трактуються як стратегія побудови ідентифікаційних моделей, орієнтована на підвищення стійкості в змінних умовах експлуатації.

Критерій «застосовність для управління рухом судна», використаний у табл. 1, оцінювався з урахуванням можливості використання методу в режимі реального часу, вимог до наявності апріорної математичної моделі, обсягу необхідних експлуатаційних даних, обчислювальних витрат та рівня інтерпретованості

результатів. Під «високою» застосовністю розуміється можливість безпосередньої інтеграції методу в системи підтримки прийняття рішень або автоматизовані навігаційні комплекси без істотних обмежень за часом обчислень і стабільністю ідентифікації. Оцінка «перспективна» використовується для методів, які демонструють високий потенціал, але потребують додаткової адаптації або валідації в реальних експлуатаційних умовах.

Наведена класифікація свідчить, що сучасні дослідження у сфері ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден еволюціонують у напрямі адаптивних та гібридних методів, орієнтованих на використання експлуатаційних навігаційних даних. При цьому ключовим викликом залишається забезпечення балансу між точністю ідентифікації, фізичною інтерпретованістю параметрів та можливістю інтеграції результатів у процес управління рухом судна в реальному часі.

З метою усунення суб'єктивності експертних оцінок та підвищення аналітичної цінності огляду проведено формалізоване порівняння основних класів методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден за низкою критеріїв, що мають принципове значення для задач управління рухом. До таких критеріїв віднесено можливість роботи в реальному часі, потребу в апріорній математичній моделі, вимоги до обсягу експлуатаційних даних, обчислювальні витрати, інтерпретованість результатів, здатність до оцінювання невизначеності та стійкість до навігаційних шумів.

У табл. 2 наведено результати формалізованого порівняння за шкалою «0 / + / ++».

Таблиця 2

Порівняльна оцінка сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден

Клас методів	Апріорна модель	Реальний час	Обсяг даних	Обчислювальні витрати	Інтерпретованість	Оцінка невизначеності	Стійкість до шумів
Класичні параметричні модельно-орієнтовані (Nomoto/MMG + LS, KF)	++	+	0	+	++	0	+
Рекурсивні та онлайн-методи (RLS, adaptive EKF)	+	++	+	+	+	+	+
Нелінійні та багатоінноваційні методи	+	+	+	0	+	0	+
Методи на основі SVM / SVR	0	+	+	+	0	0	++
Gaussian Process Regression (GPR)	0	+	++	0	+	++	++
Нейронні мережі та глибинне навчання (LSTM, RBF, ensemble)	0	+	0	0	0	0	+
Гібридні (grey-box) підходи	++	++	+	+	++	+	++
Інтелектуальні адаптивні ансамблеві стратегії	0	+	+	0	0	+	++

Формалізований аналіз, наведений у табл. 2, підтверджує, що жоден із розглянутих класів методів не є універсальним для всіх сценаріїв управління рухом судна. Класичні модельно-орієнтовані підходи характеризуються високою інтерпретованістю, але обмеженою адаптивністю, тоді як орієнтовані на дані методи забезпечують стійкість до шумів за рахунок зростання вимог до даних і обчислювальних ресурсів. Найбільш збалансовані показники демонструють гібридні (grey-box) підходи, що поєднують фізичну обґрунтованість моделей із можливістю адаптивної корекції параметрів у реальних умовах експлуатації.

Результати та їх обговорення

Результатом проведеного дослідження є систематизація та формалізоване порівняння сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з позицій їх придатності для задач управління рухом. Отримані результати узагальнюють наявні наукові підходи та дозволяють виявити ключові закономірності їх розвитку, сильні сторони та обмеження в контексті практичного застосування.

Порівняльний аналіз, представлений у табл. 1 і 2, показує, що класичні модельно-орієнтовані методи забезпечують високу фізичну інтерпретованість параметрів, однак поступаються сучасним адаптивним і орієнтованим на дані підходам за рівнем точності та здатністю працювати в умовах змінних експлуатаційних факторів. Рекурсивні та онлайн-методи частково компенсують ці недоліки, проте залишаються чутливими до шумів і дрейфу параметрів при тривалій експлуатації.

Отримані результати узгоджуються з висновками попередніх досліджень, у яких наголошувалося на обмеженій універсальності окремих класів методів та необхідності компромісу між інтерпретованістю моделей і їх адаптивністю. Дані огляду підтверджують, що орієнтовані на дані методи, зокрема підходи на основі машинного навчання, демонструють підвищену стійкість до навігаційних шумів і нелінійних ефектів, однак потребують значних обсягів якісних даних та мають обмежену прозорість результатів.

Найбільш збалансовані результати за сукупністю критеріїв демонструють гібридні (grey-box) підходи, які поєднують фізично обґрунтовані математичні моделі з адаптивними алгоритмами корекції параметрів. Це пояснює зростаючий інтерес до таких методів у сучасних дослідженнях та їхню перспективність для інтеграції в системи підтримки прийняття рішень і автоматизовані навігаційні комплекси.

Таким чином, результати огляду підтверджують доцільність подальших досліджень, спрямованих на розвиток адаптивних і гібридних методів ідентифікації, а також на підвищення їх стійкості та відтворюваності в реальних умовах експлуатації суден. Отримані узагальнення мають як наукове значення для розвитку теорії ідентифікації динамічних систем, так і

практичну цінність для вдосконалення процесів управління рухом суден.

Висновки

У статті здійснено аналіз і систематизацію сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з позицій їх впливу на ефективність процесу управління рухом. Показано, що еволюція методів ідентифікації відбувається у напрямі переходу від класичних параметричних модельно-орієнтованих підходів до адаптивних, нелінійних і орієнтованих на дані методів, орієнтованих на використання експлуатаційних навігаційних даних.

Установлено, що традиційні методи, засновані на натурних маневрових випробуваннях та спрощених математичних моделях, забезпечують фізичну інтерпретованість параметрів, проте мають обмежену точність і адаптивність в умовах змінних експлуатаційних факторів. Натомість сучасні орієнтовані на дані та інтелектуальні підходи дозволяють підвищити точність ідентифікації та забезпечити адаптацію параметрів у реальному часі, однак часто супроводжуються зростанням обчислювальної складності та проблемами інтерпретованості результатів.

Проведена класифікація методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден дозволила виділити гібридні підходи як найбільш перспективний напрям подальших досліджень, оскільки вони забезпечують баланс між точністю, адаптивністю та фізичною обґрунтованістю моделей. Особливої уваги потребує питання інтеграції результатів ідентифікації у системи підтримки прийняття рішень та інтелектуальні навігаційні комплекси.

Узагальнення результатів огляду дозволяє виокремити кілька типових сценаріїв застосування методів ідентифікації. В умовах обмежених обсягів даних і жорстких вимог до роботи в реальному часі (портові акваторії, внутрішні водні шляхи) найбільш доцільними є рекурсивні та гібридні підходи з адаптивною корекцією параметрів. Для задач офлайн-калібрування за наявності великих масивів експлуатаційних даних ефективними є орієнтовані на дані та нейромережеві моделі. У системах автономного судноводіння особливого значення набувають методи, що забезпечують оцінювання невизначеності та стійкості до збурень, зокрема байєсівські та hybrid grey-box підходи.

Перспективи подальшого розвитку досліджень у даній галузі пов'язані з розробленням методів ідентифікації, здатних працювати в режимі реального часу на основі експлуатаційних навігаційних даних, враховувати змінні гідрометеорологічні умови та адаптуватися до індивідуальних особливостей судна. Доцільним є також поєднання методів ідентифікації з цифровими двійниками суден і автономними системами управління рухом, що створює передумови для підвищення безпеки судноплавства та ефективності навігаційних рішень.

Аналіз літератури дозволяє виділити низку відкритих наукових питань, що потребують подальших досліджень: (i) забезпечення ідентифікованості параметрів маневрування в умовах змінного навантаження та гідрометеорологічних впливів; (ii) розділення впливів керма, рушія, вітру та течії у процесі ідентифікації; (iii) компенсація дрейфу параметрів у тривалій експлуатації судна; (iv) перенесення ідентифікаційних моделей між суднами різних типів; (v) валідація методів на повномасштабних експлуатаційних даних. Усунення зазначених обмежень є ключовою передумовою підвищення ефективності управління рухом суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Parameter Identification of Ship Maneuvering Models Using Recursive Least Square Method Based on Support Vector Machines / Zhu M., Hahn A., Wen Y., Bolles A. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, The TransNav*. 2017. Vol. 11(1). Pp. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.11.01.01>.
- [2] Іванов С. В., Тейт В. М., Олійник П. Б. Ідентифікація параметрів математичної моделі судна для забезпечення автоматичного керування в умовах переходу. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Т. 3, no. 4(75). С. 32-36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42139>.
- [3] Song C., Zhang X., Zhang G. Nonlinear Identification for 4-DOF Ship Maneuvering Modeling via Full-Scale Trial Data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 69(2). Pp. 1829-1835. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3062255>.
- [4] Ship Steering Adaptive CGS Control Based on EKF Identification Method / Guan W., Peng H., Zhang X., Sun H. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(2). Article 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10020294>.
- [5] Nguyen H. D. Recursive identification of ship manoeuvring dynamics and hydrodynamics. *ANZIAM Journal*. 2008. Vol. 49. Pp. 717-732. DOI: <https://doi.org/10.21914/anziamj.v49i0.358>.
- [6] Online Identification Method for Motion Model Parameters of Unmanned Surface Vehicle / X. Sun et al. *37th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Xiamen, China, 16-19 May 2025. Pp. 1681-1685. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC65474.2025.11090779>.
- [7] Bai W., Ren J., Li T. Multi-Innovation Gradient Iterative Locally Weighted Learning Identification for A Nonlinear Ship Maneuvering System. *China Ocean Engineering*. 2018. Vol. 32(3). Pp. 288-300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13344-018-0030-0>.
- [8] Ship Manoeuvring Model Parameter Identification Using Intelligent Machine Learning Method and the Beetle Antennae Search Algorithm / C. Chen et al. *ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, 9-14 June 2019. Article V07BT06A028. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2019-95565>.
- [9] A Constrained Least Squares Algorithm for Maneuvering Dynamics Identification of Marine Crafts / Y. Zhong et al. *42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, 24-26 July 2023. Pp. 1379-1384. DOI: <https://doi.org/10.23919/CCC58697.2023.10240564>.
- [10] System Identification of Abkowitz Model for Ship Maneuvering Motion Based on ϵ -Support Vector Regression / B. Liu et al. *ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, 9-14 June 2019. Article V07AT06A067. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2019-96699>.
- [11] Identification and Prediction of Ship Maneuvering Motion Based on a Gaussian Process with Uncertainty Propagation / Xue Y., Liu Y., Xue G., Chen G. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(8). Article 804. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9080804>.
- [12] Zhang Z., Ren J. Locally Weighted Non-Parametric Modeling of Ship Maneuvering Motion Based on Sparse Gaussian Process. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(6). Article 606. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9060606>.
- [13] Identification of USV Maneuvering Model Based on Multi-Output Gaussian Process Regression / Z. Hong et al. *2023 China Automation Congress (CAC)*, Chongqing, China, 17-19 November 2023. Pp. 6300-6305. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC59555.2023.10451338>.
- [14] Dynamic system identification of underactuated ship dynamics based on Gaussian process regression / Zhang P., Liu J., Xie L., Li S. *2021 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Wuhan, China, 22-24 October 2021. Pp. 954-960. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTIS54573.2021.9798415>.
- [15] Identification modeling and prediction of ship maneuvering motion based on LSTM deep neural network / Y. Jiang et al. *Journal of Marine Science and Technology*. 2022. Vol. 27(1). Pp. 125-137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00819-9>.
- [16] Self-organizing data-driven prediction model of ship maneuvering fast-dynamics / N. Wang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 288. Article 115989. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115989>.
- [17] Li S. Y., Xiang J., Xia G. H. Enhancing Ship Maneuvering Models through Hybrid Integration of Data-Driven Velocity Calibrator for Improved Performance. *OCEANS 2024 – Singapore*, Singapore, Singapore, 15-18 April 2024. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS51537.2024.10682323>.
- [18] Incorporating Approximate Dynamics Into Data-Driven Calibrator: A Representative Model for Ship Maneuvering Prediction / T. Wang et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 18(3).

- Pp. 1781-1789. DOI: [20] Online prediction of ship maneuvering motions based on adaptive weighted ensemble learning under dynamic changes / Y. Yu et al. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2024. Vol. 18(1). Article 2341922. DOI: <https://doi.org/10.1080/19942060.2024.2341922>.
- [19] Multi-objective optimal input design for grey-box identification modelling of ship manoeuvring motion / L. Jiang et al. *Ships and Offshore Structures*. 2025. Vol. 20(2). Pp. 178-187. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3088404>.

ANALYSIS OF CURRENT APPROACHES TO IDENTIFYING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SHIP MANEUVERING

- Lesnevskiy V.M.** PhD student, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4195-5678>, e-mail: vlad.lesnevskiy@gmail.com;
- Kalinichenko Y.V.** PhD (Engineering), associate professor, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

The article provides a comprehensive review and systematization of modern methods for identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering. It analyzes classical model-oriented parametric approaches based on the use of mathematical models such as Nomoto and MMG in combination with least squares methods and Kalman filters, as well as recursive and online algorithms focused on real-time parameter adaptation. Particular attention is paid to nonlinear, innovative, and data-oriented methods, in particular approaches based on support vector regression, Gaussian process regression, and neural networks, which allow for complex nonlinear effects and variable operating conditions to be taken into account. The methods considered are classified by type of mathematical model, identification algorithm, source of input data, and suitability for use in ship motion control systems. It is shown that traditional model-oriented approaches are characterized by physically interpretable parameters but have limited accuracy and adaptability in real sailing conditions. Modern data-oriented and intelligent methods, on the contrary, provide increased accuracy and adaptability, but are accompanied by increased computational complexity and problems with the interpretability of results. Based on the analysis, the feasibility of developing hybrid (grey-box) approaches that combine physically based mathematical models with adaptive data-oriented algorithms is justified. It is noted that such approaches are promising for integration into decision support systems, digital ship twins, and intelligent navigation complexes. The results obtained create scientific prerequisites for further research aimed at developing adaptive methods for identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering using operational navigation data and improving the efficiency of motion control in real operating conditions.

Keywords: ship maneuvering, dynamic characteristics, parameter identification, ship motion control, mathematical modeling, adaptive methods, data-driven approaches, hybrid models.

References

- [1] M. Zhu, A. Hahn, Y. Wen, and A. Bolles, "Parameter Identification of Ship Maneuvering Models Using Recursive Least Square Method Based on Support Vector Machines," *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, The TransNav*, vol. 11, no. 1, pp. 23-29, 2017. doi: [10.12716/1001.11.01.01](https://doi.org/10.12716/1001.11.01.01).
- [2] S. Ivanov, V. Teut, and P. Oliynyk, "Identyfikatsiia parametriv matematychnoi modeli sudna dlia zabezpechennia avtomatychnoho ke-ruvannia v umovakh perekhodu" ["Identification of ship mathematical model parameters for support of automatic control in voyage conditions"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 4(75), pp. 32-36, 2015. doi: [10.15587/1729-4061.2015.42139](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42139). (Ukr.)
- [3] C. Song, X. Zhang, and G. Zhang, "Nonlinear Identification for 4-DOF Ship Maneuvering Modeling via Full-Scale Trial Data," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 2, pp. 1829-1835, 2022. doi: [10.1109/TIE.2021.3062255](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3062255).
- [4] W. Guan, H. Peng, X. Zhang, and H. Sun, "Ship Steering Adaptive CGS Control Based on EKF Identification Method," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 2, article 294, 2022. doi: [10.3390/jmse10020294](https://doi.org/10.3390/jmse10020294).
- [5] H. D. Nguyen, "Recursive identification of ship manoeuvring dynamics and hydrodynamics," *ANZIAM Journal*, vol. 49, pp. 717-732, 2008. doi: [10.21914/anziamj.v49i0.358](https://doi.org/10.21914/anziamj.v49i0.358).
- [6] X. Sun, D. Mu, X. Song, D. Zhang, J. Shao, and Y. An, "Online Identification Method for Motion Model Parameters of Unmanned Surface Vehicle," in *Proc. of the 37th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC)*, Xiamen, China, May 16-19, 2025,

- pp. 1681-1685. doi: **10.1109/CCDC65474.2025.11090779**.
- [7] W. Bai, J. Ren, and T. Li, "Multi-Innovation Gradient Iterative Locally Weighted Learning Identification for A Nonlinear Ship Maneuvering System," *China Ocean Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 288-300, 2018. doi: **10.1007/s13344-018-0030-0**.
- [8] C. Chen et al., "Ship Manoeuvring Model Parameter Identification Using Intelligent Machine Learning Method and the Beetle Antennae Search Algorithm," in *Proc. of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, June 9-14, 2019, article V07BT06A028. doi: **10.1115/OMAE2019-95565**.
- [9] Y. Zhong, C. Yu, G. Xiang, J. Cao, X. Xiang, and L. Lian, "A Constrained Least Squares Algorithm for Maneuvering Dynamics Identification of Marine Crafts," in *Proc. of the 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, July 24-26, 2023, pp. 1379-1384. doi: **10.23919/CCC58697.2023.10240564**.
- [10] B. Liu, Y. Jin, A.R. Magee, L.J. Yiew, and S. Zhang, "System Identification of Abkowitz Model for Ship Maneuvering Motion Based on ε -Support Vector Regression," in *Proc. of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, June 9-14, article V07AT06A067. doi: **10.1115/OMAE2019-96699**.
- [11] Y. Xue, Y. Liu, G. Xue, and G. Chen, "Identification and Prediction of Ship Maneuvering Motion Based on a Gaussian Process with Uncertainty Propagation," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 8, article 804, 2021. doi: **10.3390/jmse9080804**.
- [12] Z. Zhang, and J. Ren, "Locally Weighted Non-Parametric Modeling of Ship Maneuvering Motion Based on Sparse Gaussian Process," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 6, article 606, 2021. doi: **10.3390/jmse9060606**.
- [13] Z. Hong, X. Wang, M. Li, Y. Gu, J. Zhao, and X. Cao, "Identification of USV Maneuvering Model Based on Multi-Output Gaussian Process Regression," in *Proc. of the China Automation Congress (CAC)*, Chongqing, China, Nov. 17-19, 2023, pp. 6300-6305. doi: **10.1109/CAC59555.2023.10451338**.
- [14] P. Zhang, J. Liu, L. Xie, and S. Li, "Dynamic system identification of underactuated ship dynamics based on Gaussian process regression," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Wuhan, China, Oct. 22-24, 2021, pp. 954-960. doi: **10.1109/ICTIS54573.2021.9798415**.
- [15] Y. Jiang, X.-R. Hou, X.-G. Wang, Z.-H. Wang, Z.-L. Yang, and Z.-J. Zou, "Identification modeling and prediction of ship maneuvering motion based on LSTM deep neural network," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 125-137, 2022. doi: **10.1007/s00773-021-00819-9**.
- [16] N. Wang, H. Wu, Y. Zhang, J. Song, Y. Lin, and L. Hao, "Self-organizing data-driven prediction model of ship maneuvering fast-dynamics," *Ocean Engineering*, vol. 288, article 115989, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.115989**.
- [17] S.Y. Li, J. Xiang, and G.H. Xia, "Enhancing Ship Maneuvering Models through Hybrid Integration of Data-Driven Velocity Calibrator for Improved Performance," in *Proc. of the OCEANS 2024 – Singapore*, Singapore, Singapore, April 15-18, 2024, pp. 1-6. doi: **10.1109/OCEANS51537.2024.10682323**.
- [18] T. Wang, G. Li, L.I. Hatledal, R. Skulstad, V. AEsøy, and H. Zhang, "Incorporating Approximate Dynamics Into Data-Driven Calibrator: A Representative Model for Ship Maneuvering Prediction," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 1781-1789, 2022. doi: **10.1109/TII.2021.3088404**.
- [19] L. Jiang, X. Shang, B. Jin, C. Ji, and Z. Zhang, "Multi-objective optimal input design for grey-box identification modelling of ship manoeuvring motion," *Ships and Offshore Structures*, vol. 20, no. 2, pp. 178-187, 2025. doi: **10.1080/17445302.2024.2335452**.
- [20] Y. Yu, H. Hao, Z. Wang, Y. Peng, and S. Xie, "Online prediction of ship maneuvering motions based on adaptive weighted ensemble learning under dynamic changes," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 18, no. 1, article 2341922, 2024. doi: **10.1080/19942060.2024.2341922**.

Стаття надійшла 13.10.2025

Стаття прийнята 02.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Лесневський В. М., Калініченко Є. В. Аналіз сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 197-204. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351125>.

**МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СУДНОВИХ
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ У СКЛАДІ СИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ЗНИЖЕННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ ТОРГОВИХ СУДЕН****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

У статті розглянуто проблему формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден, актуальність якої зумовлена зростанням вимог до енергетичної ефективності флоту та необхідністю підвищення обґрунтованості управлінських рішень у процесі експлуатації суден. Метою роботи є обґрунтування та формалізація методичних основ формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів як складової інтегрованої системи управління енергетичними втратами. У дослідженні застосовано системний підхід, методи структурно-логічного моделювання, функціонально-структурного аналізу та логіко-аналітичного узагальнення, що дозволило формалізувати процес моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу. Основним результатом роботи є розроблення узагальненої структурно-логічної схеми методики формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів, яка відображає послідовність етапів її реалізації та визначає взаємозв'язки між інформаційними, аналітичними та експлуатаційними процесами. Показано, що запропонована методика створює методичне підґрунтя для інтеграції підсистеми моніторингу з процесами експлуатації та технічного обслуговування судна і може бути використана при проєктуванні та модернізації бортових інформаційних систем, орієнтованих на зниження енергетичних втрат. Наукова новизна роботи полягає у формалізації методичних основ формування підсистеми моніторингу як елемента системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден. Практична значущість визначається можливістю застосування запропонованої методики для підвищення ефективності використання даних моніторингу у задачах управління енергоефективністю суден. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розвиток прогностичних і прескриптивних алгоритмів на основі результатів моніторингу.

Ключові слова: підсистема моніторингу, суднові технічні засоби, енергетичні втрати, енергоефективність судна, інформаційна система, методичні основи, структурно-логічна схема, експлуатація суден.

Постановка проблеми

Підвищення енергетичної ефективності торгових суден є однією з ключових задач сучасного морського транспорту, що зумовлено зростанням вартості енергоресурсів, посиленням міжнародних екологічних вимог та необхідністю зниження експлуатаційних витрат флоту. Значна частина енергетичних втрат у процесі експлуатації суден пов'язана з відхиленнями технічного стану та нераціональними режимами роботи суднових технічних засобів (СТЗ), які своєчасно не виявляються або недостатньо враховуються в системах управління енергоефективністю.

Незважаючи на активний розвиток бортових автоматизованих систем контролю, існуючі підходи до моніторингу суднових технічних засобів, як правило, орієнтовані на вирішення локальних задач технічної діагностики та не забезпечують комплексного інформаційного супроводу процесів зниження енергетичних втрат судна. Відсутність єдиної методичної основи формування підсистеми моніторингу призводить до фрагментарності інформаційних потоків, ускладнює інтеграцію даних з процесами експлуатації та технічного обслуговування (ТО) і знижує ефективність прийняття управлінських рішень.

Таким чином, наукова проблема, що розглядається у статті, полягає у відсутності узагальненої методики формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів, яка б забезпечувала її системну

інтеграцію в контур управління комплексним зниженням енергетичних втрат торгових суден. Вирішення цієї проблеми потребує визначення структурних і функціональних складових підсистеми моніторингу, формалізації етапів її моделювання та побудови, а також обґрунтування взаємозв'язків між інформаційними, аналітичними та експлуатаційними процесами.

Предметом дослідження є методи та підходи до формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден. Основними аспектами дослідження є структурна організація підсистеми моніторингу, принципи формування інформаційних потоків, а також інтеграція результатів моніторингу з процесами експлуатації та технічного обслуговування судна.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення методично-обґрунтованих рішень, які дозволяють підвищити ефективність використання даних про технічний стан і режими роботи суднових технічних засобів у задачах управління енергетичними втратами. У цьому контексті особливого значення набуває розроблення узагальненої методики, здатної стати основою для подальшої реалізації прогностичних і прескриптивних підходів до управління енергоефективністю торгових суден.

Вирішення поставленої проблеми передбачає формування методичних основ побудови підсистеми

моніторингу, що визначає логіку та послідовність її реалізації і створює передумови для підвищення енергетичної ефективності суден у сучасних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика комплексного зниження енергетичних втрат на торгових суднах у сучасних дослідженнях розвивається за кількома взаємопов'язаними напрямками: (1) енергоефективне проєктування та експлуатація суднових енергосистем; (2) побудова та інтеграція систем моніторингу технічного стану і режимів роботи СТЗ; (3) застосування інтелектуальних та даних-орієнтованих методів для раннього виявлення деградації та оптимізації режимів. Водночас у значній частині робіт відсутня узагальнена методика формування саме підсистеми моніторингу СТЗ як складової системи комплексного зниження енергетичних втрат, що ускладнює відтворюваність рішень, їх масштабування та інтеграцію з експлуатаційними процесами.

Дослідження, орієнтовані на енергоефективність життєвого циклу судна, наголошують на потребі врахування заходів енергозбереження ще на ранніх етапах проєктування, а також на важливості безперервного моніторингу для виявлення джерел втрат енергії в обладнанні та допоміжних системах [1]. Окремим напрямом є практичні методології побудови систем вимірювання параметрів енергопостачання: запропоновано підхід до встановлення систем моніторингу якості електроенергії з використанням взаємопов'язаних вимірювальних приладів у локальних мережах для оптимізації критичних навантажень [2]. Такі роботи демонструють прикладну цінність мережових вимірювань, однак переважно фокусуються на окремих підсистемах (електроенергетиці) без методичного узгодження з моніторингом стану СТЗ як джерела енергетичних втрат. Суттєвий пласт робіт стосується інтеграції моніторингу технічного стану з бортовими автоматизованими системами та передаванням даних на берег. У сучасних дослідженнях показано, що інтеграція підсистем моніторингу з бортовими автоматизованими системами керування та сигналізації дозволяє реалізувати контроль технічного стану суднового обладнання в режимі реального часу, а також забезпечити передавання діагностичної інформації до берегових служб. Важливим є й підхід до інтегрованих систем зменшення енерговитрат, де підсистема моніторингу розглядається як елемент загального рішення [3]. Разом із тим у цих публікаціях недостатньо формалізовано саме поетапну методику побудови підсистеми моніторингу СТЗ (від постановки цілей і структури даних до інтеграції з ТО та експлуатаційними рішеннями).

Окремі дослідження зосереджені на методологіях підвищення енергоефективності суднових енергетичних систем [4]. Окремі дослідження зосереджені на побудові інтегрованих систем моніторингу морських дизельних двигунів з метою зниження експлуатаційних

витрат та підвищення безпеки. Разом з тим у таких роботах фокус, як правило, обмежується окремими класами суднових технічних засобів, що не забезпечує комплексного підходу до зниження енергетичних втрат судна в цілому. Їхнім сильним боком є орієнтація на практичні сценарії експлуатації двигунів, однак фокус здебільшого зужений до одного класу СТЗ (дизельні двигуни), тоді як комплексне зниження енергетичних втрат потребує узгодженого моніторингу ширшого переліку СТЗ (енергетична установка, електромережа, допоміжні механізми, системи теплопостачання тощо).

У напрямі інтелектуалізації моніторингу запропоновано системи оцінювання експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання на основі марковських ланцюгів, імовірнісних моделей та багатокритеріальної оптимізації [5]. Також показано, що даних-орієнтовані методи діагностики з використанням машинного навчання дозволяють на ранній стадії виявляти несправності, що розвиваються, і тим самим створюють передумови підвищення енергоефективності [6]. Перевагою цих підходів є потенціал прогнозування й автоматизації, однак у багатьох випадках залишаються відкритими питання уніфікації даних, узгодження моделей із експлуатаційними режимами, а також вбудовування результатів моніторингу в контур прийняття рішень (експлуатація/ТО) для саме комплексного зниження енергетичних втрат. Розвиток інформаційно-діагностичних комплексів для оцінювання технічного стану обладнання також підтверджує важливість систематизації даних і алгоритмів у реальних технологічних системах [7]. Поряд із цим представлено інформаційні системи для моніторингу та прогнозування технічного стану енергетичної установки судна [8], а також обчислювальні методи моніторингу енергоспоживання та оцінки прихованих втрат енергії в технологічних системах [9]. Дані результати демонструють, що моніторинг має бути поєднаний з аналітикою й прогнозом, однак у цих працях не завжди відображено методичний зв'язок між: (а) моделлю предметної області СТЗ; (б) структурою бази даних; (в) правилами/алгоритмами оцінювання; (г) механізмами інтеграції з експлуатаційним контуром зниження втрат.

Публікації, присвячені технічним та експлуатаційним заходам скорочення викидів і підвищення екологічної та енергетичної ефективності суден, дають ширший контекст, однак, як правило, не деталізують питання побудови підсистеми моніторингу СТЗ як інструменту керування енергетичними втратами [10]. Водночас існують фундаментальні підходи до оцінки та прогнозування технічного стану складних технічних систем суден у складних умовах [11], а також методи оцінки економічних вигод від інтеграції відновлюваних джерел енергії та накопичувачів у суднові енергосистеми [12]. Ці роботи важливі як теоретична та економічна основа, проте вони не замінюють потреби у структурованій методиці побудови підсистеми

моніторингу СТЗ, яка забезпечує збір релевантних даних і зворотний зв'язок для управління втратами.

Важливим напрямом сучасних досліджень є розвиток методів технічного обслуговування суднових енергетичних і допоміжних систем на основі даних моніторингу, що безпосередньо пов'язано зі зниженням енергетичних втрат у процесі експлуатації. Так, у роботі автора Головань А.І. розглянуто особливості оптимізації плану технічного обслуговування термоелектричних генераторів суднових пропульсивних систем із використанням підходів інтелектуальної оптимізації та аналізу експлуатаційних даних [13]. Отримані результати демонструють, що ефективність технічного обслуговування суттєво залежить від якості та повноти інформації про технічний стан обладнання, що підкреслює необхідність наявності структурованої підсистеми моніторингу як джерела вхідних даних для оптимізаційних процедур. У контексті забезпечення надійності та енергоефективності суднових систем електропостачання заслуговує на увагу робота, присвячена оптимізації періодичності контролю залишкової ємності свинцево-кислотних акумуляторів аварійних джерел живлення суден на основі імітаційного моделювання методом Монте-Карло [14]. Автори показують, що обґрунтований вибір частоти вимірювань параметрів технічного стану дозволяє знизити ризики відмов і водночас оптимізувати витрати на обслуговування. Разом з тим у зазначеній роботі питання інтеграції процедур моніторингу в загальну систему управління енергетичними втратами судна розглядається опосередковано, без формалізації методики побудови відповідної підсистеми моніторингу. Подальший розвиток даного напрямку представлено в дослідженні, присвяченому цифровим двійникам та IoT як інструментам підвищення ефективності інформаційного обміну в системах технічного обслуговування суден. Запропонована авторами комплексна цифрова рамка демонструє потенціал інтеграції даних моніторингу, моделей технічного стану та експлуатаційних процесів у єдиному інформаційному середовищі. Водночас зазначене дослідження зосереджене переважно на інформаційній взаємодії та цифровій інфраструктурі, залишаючи відкритим питання методичного поетапного формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів саме з позицій комплексного зниження енергетичних втрат. Таким чином, результати робіт [15] підтверджують зростаючу роль систем моніторингу, цифрових технологій та даних-орієнтованого технічного обслуговування у підвищенні енергоефективності та надійності суден. Разом з тим вони також підкреслюють наявність методичної прогалини, що полягає у відсутності узагальненої, структурно формалізованої методики формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів, інтегрованої в систему комплексного зниження енергетичних втрат. Усунення цієї прогалини і становить науково-методичну основу поданого дослідження.

Отже, аналіз сучасних публікацій показує наявність значних напрацювань щодо окремих

компонентів (моніторинг якості електроенергії, інтеграція з AMS/двигуном, інтелектуальні методи діагностики, прогноз стану, оцінка прихованих втрат), однак недостатньо дослідженим залишається питання методичного (поетапного) формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів саме як частини системи комплексного зниження енергетичних втрат, включаючи: узгодження цілей і KPI; побудову архітектури та структури даних; визначення алгоритмів обробки й оцінювання; механізми інтеграції з експлуатацією та технічним обслуговуванням. Саме усунення цієї прогалини і визначає напрям власного дослідження та обґрунтовує доцільність розроблення узагальненої методики, представленої у вигляді структурно-логічної схеми.

Мета статті

Метою статті є обґрунтування та формалізація методичних основ формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів як складової системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден шляхом розроблення узагальненої структурно-логічної схеми моделювання та побудови відповідної інформаційної системи.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процеси інформаційного забезпечення моніторингу технічного стану та режимів роботи суднових технічних засобів торгових суден у контурі управління енергетичними втратами.

Предметом дослідження є методи та підходи до формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів як складової інформаційної системи комплексного зниження енергетичних втрат судна.

Як матеріали дослідження використано узагальнені дані про структуру та функціонування суднових технічних засобів, режими їх експлуатації, а також типові інформаційні потоки, що формуються бортовими автоматизованими системами контролю та управління. Аналіз здійснювався без прив'язки до конкретного типу судна, що забезпечує універсальність запропонованої методики.

У роботі застосовано системний підхід до аналізу та синтезу інформаційної системи моніторингу, що дозволило розглядати підсистему моніторингу як елемент ієрархічної структури системи управління енергетичними втратами судна. Для формалізації взаємозв'язків між елементами підсистеми використано структурно-логічне моделювання, результатом якого є узагальнена схема методики моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу.

При формуванні методичних основ використано методи декомпозиції складних технічних систем, функціонально-структурного аналізу, а також логіко-аналітичного узагальнення результатів аналізу наукових публікацій і практичного досвіду експлуатації суднових технічних засобів. Для оцінювання логічної

узгодженості етапів методики застосовано методи експертного аналізу та порівняльного зіставлення варіантів побудови підсистеми моніторингу.

Інструментально дослідження виконувалося із застосуванням засобів структурного моделювання інформаційних систем, що забезпечило формалізоване представлення етапів формування підсистеми моніторингу та можливість її подальшої адаптації до конкретних умов експлуатації суден.

Таким чином, використані матеріали та методи забезпечують відтворюваність запропонованої методики, а також її практичну придатність для застосування на різних типах торгових суден без втрати узагальненого характеру результатів.

Виклад основного матеріалу

Сучасні підходи до підвищення енергетичної ефективності торгових суден передбачають перехід від фрагментарного контролю окремих параметрів суднових технічних засобів до інтегрованих інформаційних систем, здатних забезпечити комплексний моніторинг їх технічного стану та режимів роботи. У таких умовах особливого значення набуває формування підсистеми моніторингу, яка повинна не лише акумулювати дані від різнорідних джерел, але й забезпечувати їх узгоджене використання в задачах зниження енергетичних втрат судна.

Аналіз існуючих рішень у галузі суднової автоматизації показує, що на практиці підсистеми моніторингу суднових технічних засобів часто реалізуються ізольовано, без чітко визначеної методичної основи їх інтеграції з системами управління енергетичною ефективністю та процесами експлуатації. Це призводить до обмеженого використання потенціалу наявних інформаційних ресурсів і ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації режимів роботи суднових технічних засобів.

У зв'язку з цим виникає необхідність методичного узагальнення процесу формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів, яке б враховувало її місце у структурі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден. Таке узагальнення має забезпечувати поетапне моделювання інформаційної системи моніторингу, визначення її архітектури, функціональних зв'язків та взаємодії з експлуатаційними і технічними процесами.

Для вирішення зазначеної науково-практичної задачі у роботі запропоновано узагальнену методику моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу суднових технічних засобів, яка формалізує основні етапи формування відповідної підсистеми та встановлює логічні взаємозв'язки між ними. Методика орієнтована на застосування в умовах реальної експлуатації торгових суден і може бути адаптована до різних типів суднових енергетичних установок та рівнів автоматизації.

З урахуванням поставленої мети у роботі під формуванням підсистеми моніторингу суднових технічних засобів розуміється не лише вибір засобів контролю та каналів збору даних, а методично обґрунтований процес побудови цілісного інформаційного контуру, який забезпечує: (i) систематичне отримання достовірних даних про технічний стан і режими роботи СТЗ; (ii) їх перетворення в показники енергетичних втрат і неефективності; (iii) підтримку управлінських рішень щодо режимів експлуатації та технічного обслуговування у межах системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден.

Методичні основи формування підсистеми моніторингу в даному дослідженні базуються на таких положеннях:

1. цільова орієнтація – встановлення цілей моніторингу та набору індикаторів (KPI), що пов'язують параметри СТЗ з енергетичними втратами;

2. системність і сумісність – узгодження підсистеми моніторингу з бортовими автоматизованими системами, структурою енергетичної установки та умовами експлуатації;

3. єдність даних і моделей – формування структури даних (БД), моделей предметної області та правил інтерпретації вимірювань для виявлення відхилень і причин втрат;

4. замкнений контур «моніторинг → рішення → контроль ефекту» – інтеграція результатів моніторингу з процесами експлуатації та технічного обслуговування з подальшим оновленням еталонів, моделей і порогів за результатами роботи судна.

Для забезпечення відтворюваності підходу зазначені положення формалізовано у вигляді узагальненої структурно-логічної схеми, що відображає послідовність етапів моделювання та побудови відповідної інформаційної системи: від постановки цілей і вибору архітектурного рішення до розроблення структури даних, алгоритмів обробки, інтерфейсів подання результатів і організації взаємодії з експлуатаційними процедурами. Саме така формалізація дозволяє трактувати підсистему моніторингу СТЗ як функціонально завершений елемент системи комплексного зниження енергетичних втрат і забезпечує можливість її адаптації до різних типів торгових суден та рівнів автоматизації (рис. 1).

У межах даного дослідження систему комплексного зниження енергетичних втрат торгового судна розглянуто як сукупність організаційно-технічних та інформаційно-алгоритмічних заходів, спрямованих на мінімізацію різниці між підведеною енергією (паливо, електроенергія, теплота) та корисною роботою пропульсивної й допоміжних систем. Джерела втрат доцільно групувати на теплові (неповне використання відпрацьованої теплоти, втрати в теплообмінниках), механічні (зростання тертя, деградація гвинто-рульового комплексу), електричні (низький коефіцієнт потужності, гармоніки, перевантаження), гідродинамічні (обротання, невідповідність швидкісного режиму) та

експлуатаційні (неоптимальні режими навантаження, простій). За цих умов підсистема моніторингу суднових технічних засобів має формувати єдиний інформаційний контур «вимірювання → синхронізація і нормалізація → оцінювання енергетичних втрат → виявлення відхилень → рекомендації/заявки ТО → контроль ефекту», інтегруючи дані бортових систем (ACMS/AMS/IAS/EMS) з контекстом рейсу (швидкість, осадка/вантаж, гідрометеорологічні умови) та забезпечуючи розрахунок показників енергоефективності й технічного стану. Вихідними продуктами

підсистеми є діагностичні повідомлення, ранжування причин зростання втрат, рекомендації щодо оптимізації режимів роботи та пріоритети технічного обслуговування.

Подальший виклад основного матеріалу присвячено опису зазначеної методики, представленій у вигляді структурно-логічної схеми, що відображає послідовність етапів формування підсистеми моніторингу та її інтеграцію в систему комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден (рис. 1).

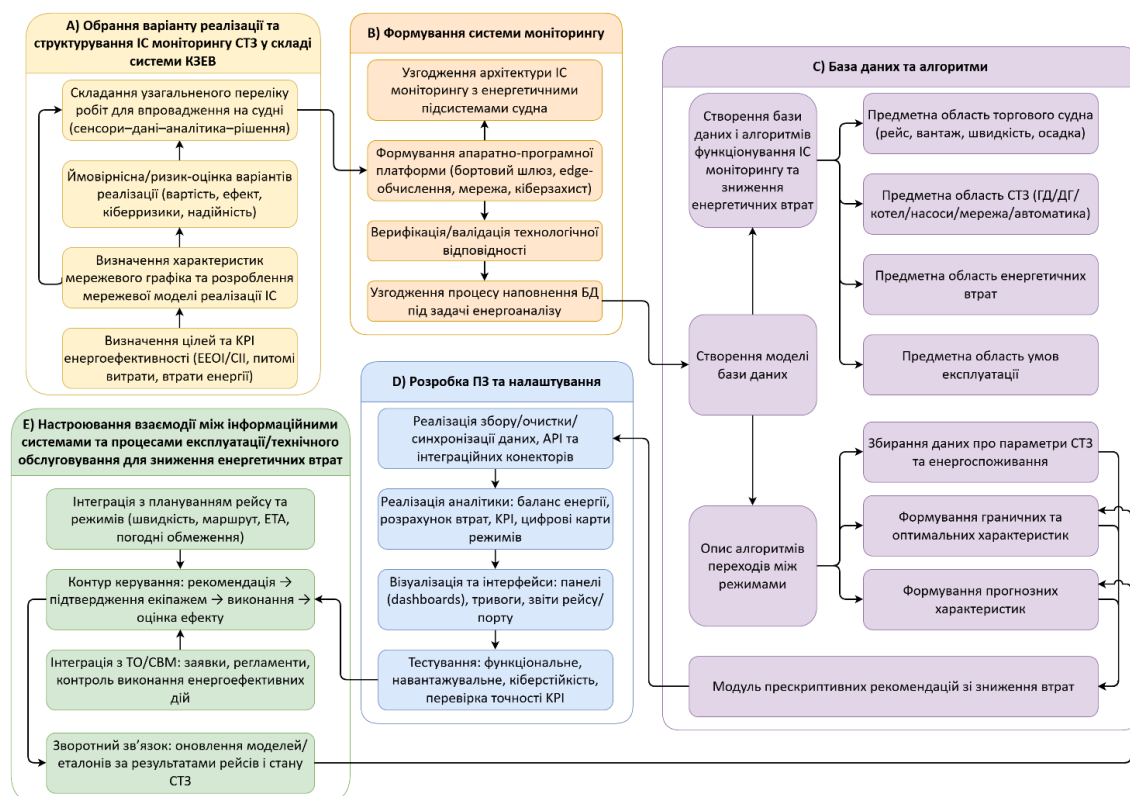


Рис. 1 – Загальна методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден

На рис. 1 представлено узагальнену структурно-логічну схему методики моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден. Запропонована методика відображає поетапний процес формування підсистеми моніторингу, починаючи від постановки цілей та вибору варіанта реалізації і завершуючи інтеграцією результатів моніторингу з процесами експлуатації та технічного обслуговування судна.

На першому етапі здійснюється визначення цілей функціонування підсистеми моніторингу та її місця у загальній системі комплексного зниження енергетичних втрат. На цьому етапі формуються ключові критерії енергоефективності, визначаються контрольовані показники та обґрунтовуються вимоги до

інформаційного забезпечення. Паралельно виконується вибір варіанта реалізації підсистеми з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних обмежень, а також проводиться оцінювання можливих ризиків і очікуваного ефекту від впровадження.

Другий етап присвячений формуванню архітектури інформаційної системи моніторингу суднових технічних засобів. На цьому етапі визначається склад апаратно-програмних компонентів, принципи збору та передавання даних, а також узгодження підсистеми моніторингу з існуючими бортовими автоматизованими системами. Особлива увага приділяється забезпеченню сумісності підсистеми з енергетичними підсистемами судна та вимогами до надійності й безперервності інформаційного обміну.

На третьому етапі здійснюється формування бази даних та моделей предметної області, що забезпечують функціонування підсистеми моніторингу. В рамках цього етапу структуруються дані про технічний стан і режими роботи суднових технічних засобів, умови експлуатації судна, а також джерела та складові енергетичних втрат. Паралельно формуються аналітичні та інформаційні моделі, які дозволяють здійснювати нормування параметрів, порівняння фактичних і еталонних характеристик та підготовку інформації для подальшого аналізу.

Четвертий етап передбачає розроблення алгоритмів функціонування підсистеми моніторингу, включаючи алгоритми збору, обробки та аналізу даних. На цьому етапі реалізуються процедури оцінювання поточного технічного стану суднових технічних засобів, виявлення відхилень від оптимальних режимів роботи та формування інформаційних ознак зростання енергетичних втрат. Отримані результати слугують основою для формування рекомендацій щодо коригування режимів експлуатації та технічних рішень.

На п'ятому етапі виконується програмна реалізація та налаштування підсистеми моніторингу, що включає інтеграцію розроблених алгоритмів з апаратними засобами збору даних, реалізацію інтерфейсів користувача та проведення тестування працездатності системи. Цей етап забезпечує перевірку адекватності запропонованої методики в умовах реальної експлуатації судна.

Завершальним етапом методики є інтеграція підсистеми моніторингу з процесами експлуатації та технічного обслуговування судна. На цьому етапі результати моніторингу використовуються для підтримки прийняття рішень щодо оптимізації режимів роботи суднових технічних засобів, планування технічного обслуговування та оцінювання ефективності заходів зі зниження енергетичних втрат. Передбачений зворотний зв'язок забезпечує уточнення моделей і параметрів підсистеми на основі накопиченого експлуатаційного досвіду.

Таким чином, наведена на рис. 1 схема відображає цілісну методику формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів, яка поєднує інформаційні, аналітичні та експлуатаційні аспекти і створює методичне підґрунтя для комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості безпосереднього використання запропонованої методики та структурно-логічної схеми при проектуванні, впровадженні та модернізації бортових інформаційних систем моніторингу суднових технічних засобів, орієнтованих на комплексне зниження енергетичних втрат торгових суден.

Запропонована схема дозволяє:

- уніфікувати процес формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів на етапах технічного проектування та експлуатації суден;

- забезпечити інтеграцію даних про технічний стан і режими роботи СТЗ з процесами аналізу енергетичних витрат і втрат у межах єдиного інформаційного контуру;
 - підвищити обґрунтованість управлінських рішень щодо вибору режимів експлуатації та технічного обслуговування суднових технічних засобів з урахуванням їхнього впливу на енергетичну ефективність;
 - скорочувати експлуатаційні витрати за рахунок своєчасного виявлення неефективних режимів роботи та відхилень технічного стану, що призводять до зростання енергетичних втрат;
 - створити методичну основу для впровадження елементів прогностичного та прескриптивного управління енергетичними процесами судна на базі даних моніторингу.
- Отримані результати можуть бути використані:
- судноплавними компаніями – при розробленні та адаптації систем енергетичного менеджменту суден;
 - проектними та інжиніринговими організаціями – при створенні або модернізації бортових автоматизованих систем;
 - експлуатаційними службами флоту – для підтримки рішень у сфері технічного обслуговування та підвищення енергоефективності суден;
 - у науково-освітній діяльності – при підготовці фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок та цифрових систем управління.

Висновки

Обґрунтовано необхідність формування підсистеми моніторингу СТЗ як ключового інформаційного елемента системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден.

Формалізовано методичні основи формування підсистеми моніторингу СТЗ, що визначають послідовність етапів від постановки цілей і КРІ втрат енергії до інтеграції з експлуатацією та технічним обслуговуванням.

Основним результатом є узагальнена структурно-логічна схема, яка описує етапи моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу (архітектура, дані/БД, алгоритми обробки, інтерфейси, механізми інтеграції).

Показано, що запропонована методика забезпечує замкнений контур «моніторинг → оцінка/виявлення втрат → рішення (режими/ТО) → контроль ефекту», створюючи основу для прогностичних і прескриптивних процедур управління енергоефективністю.

Практична значущість полягає у можливості використання методики як уніфікованої основи для

проектування, впровадження та модернізації бортових ІС моніторингу СТЗ на різних типах торгових суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Electrical design for efficiency: Technical and operational measures for optimizing the use of electrical power on ships / Sanabria Vargas Ó. A., Vergara Pestana H. D., Mendoza Iglesias R. R., Salas Berrocal G. G. *Ciencia y Tecnología de Buques*. 2023. Vol. 17(33). Pp. 33-41. DOI: <https://doi.org/10.25043/19098642.240>.
- [2] Dallas S. E., Skoufis A. D., Prousalidis J. M. Introducing a ship electric power quality monitoring system for green shipping. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, 02-05 September 2014. Pp. 2312-2318. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960508>.
- [3] Asalomia L. B., Samoilescu G. Naval Energy Management System. *Knowledge-based organization : International Conference*, Sibiu, Romania, 11-13 June 2020. Vol. 26(3). Pp. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.2478/kbo-2020-0109>.
- [4] Katelieva E. Methodology for energy efficiency improvement of ship motor driven systems. *Journal of Marine Technology and Environment*. 2022. Vol. 2. Pp. 28-33. DOI: <https://doi.org/10.53464/JMTE.02.2022.05>.
- [5] A. Yanenko. Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 205-219. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310713>.
- [6] Cheliotis M., Lazakis I., Theotokatos G. Machine learning and data-driven fault detection for ship systems operations. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 216. Article 107968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107968>.
- [7] Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes / Gaponenko S. O., Shakurova R. Z., Kondratiev A. E., Dimova R. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 124. Article 01021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401021>.
- [8] Information system for monitoring of a ship power plant and prediction of technical condition / V. Mateichyk et al. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 74. Pp. 1179-1186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.259>.
- [9] Pleskach, B. Energy Consumption Monitoring with Evaluation of Hidden Energy Losses. *International Journal of Computing*. 2022. Vol. 21, iss. 4. Pp. 482-488. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.21.4.2784>.
- [10] Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships / O. Onishchenko et al. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. Pp. 223-235. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
- [11] Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems / V. Vychuzhanin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, № 9(84). Pp. 4-11. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85605>.
- [12] Tsekouras G. J., Kanellos F. D., Prousalidis J. Simplified method for the assessment of ship electric power systems operation cost reduction from energy storage and renewable energy sources integration. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2015. Vol. 5(2). Pp. 61-69. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0011>.
- [13] Features of Op-timization 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*, Vilnius, Lithuania, 19-20 September 2025. Pp. 26-35. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_3.
- [14] 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). Pp. 179-189. DOI: <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>.
- [15] 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>.

METHODOLOGICAL BASIS FOR THE FORMATION OF A SUBSYSTEM FOR MONITORING SHIP MACHINERY AS PART OF A SYSTEM FOR THE COMPREHENSIVE REDUCTION OF ENERGY LOSSES IN MERCHANT SHIPS

Honcharuk I.P.

PhD (Engineering), associate professor, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-4206>, e-mail: h.onmu@ukr.net

The article discusses the problem of forming a subsystem for monitoring ship machinery as part of a comprehensive system for reducing energy losses in merchant ships, the relevance of which is due to the growing requirements for the

energy efficiency of the fleet and the need to improve the soundness of management decisions in the process of ship operation. The purpose of the work is to substantiate and formalize the methodological foundations for the formation of a subsystem for monitoring ship machinery as a component of an integrated energy loss management system. The study uses a systematic approach, methods of structural-logical modeling, functional-structural analysis, and logical-analytical generalization, which made it possible to formalize the process of modeling and building an information monitoring system. The main result of the work is the development of a generalized structural-logical diagram of the methodology for forming a subsystem for monitoring ship machinery, which reflects the sequence of stages of its implementation and defines the relationships between information, analytical, and operational processes. It is shown that the proposed methodology creates a methodological basis for integrating the monitoring subsystem with the processes of operation and maintenance of the vessel and can be used in the design and modernization of on-board information systems aimed at reducing energy losses. The scientific novelty of the work lies in the formalization of the methodological foundations for the formation of a monitoring subsystem as an element of a comprehensive system for reducing energy losses in merchant ships. The practical significance is determined by the possibility of applying the proposed methodology to improve the efficiency of using monitoring data in the tasks of managing the energy efficiency of ships. Further research should be directed towards the development of predictive and prescriptive algorithms based on monitoring results.

Keywords: monitoring subsystem, ship machinery, energy loss, ship energy efficiency, information system, methodological foundations, structural-logical diagram, ship operation.

References

- [1] Ó.A. Sanabria Vargas, H.D. Vergara Pestana, R.R. Mendoza Iglesias, and G.G. Salas Berrocal, "Electrical design for efficiency: Technical and operational measures for optimizing the use of electrical power on ships," *Ciencia y Tecnología de Buques*, vol. 17, no. 33, pp. 33-41, 2023. doi: **10.25043/19098642.240**.
- [2] S.E. Dallas, A.D. Skoufis, and J. M. Prousalidis, "Introducing a ship electric power quality monitoring system for green shipping," in *Proc. of the Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, Sept. 02-05, 2014, pp. 2312-2318. doi: **10.1109/ICELMACH.2014.6960508**.
- [3] L.B. Asalomia, and G. Samoilescu, "Naval Energy Management System," in *Proc. of the Int. Conf. «Knowledge-based organization»*, Sibiu, Romania, June 11-13, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 20-25, 2020. doi: **10.2478/kbo-2020-0109**.
- [4] E. Katelieva, "Methodology for energy efficiency improvement of ship motor driven systems," *Journal of Marine Technology and Environment*, no. 2, pp. 28-33, 2022. doi: **10.53464/JMTE.02.2022.05**.
- [5] A. Yanenko, "Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment," *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences*, no. 48, pp. 205-219, 2024. doi: **10.31498/2225-6733.48.2024.310713**.
- [6] M. Cheliotis, I. Lazakis, and G. Theotokatos, "Machine learning and data-driven fault detection for ship systems operations," *Ocean Engineering*, vol. 216, article 107968, 2020. doi: **10.1016/j.oceaneng.2020.107968**.
- [7] S.O. Gaponenko, R.Z. Shakurova, A.E. Kondratiev, and R. Dimova, "Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes," *E3S Web of Conferences*, vol. 124, article 01021, 2019. doi: **10.1051/e3sconf/201912401021**.
- [8] V. Mateichyk, I. Gritsuk, M. Smieszek, B. Ghita, V. Chernenko, and O. Polishchuk, "Information system for monitoring of a ship power plant and prediction of technical condition," *Transportation Research Procedia*, vol. 74, pp. 1179-1186, 2023. doi: **10.1016/j.trpro.2023.11.259**.
- [9] B. Pleskach, "Energy consumption monitoring with evaluation of hidden energy losses," *International Journal of Computing*, vol. 21, iss. 4, pp. 482-488, 2022. doi: **10.47839/ijc.21.4.2784**.
- [10] O. Onishchenko, V. Golikov, O. Melnyk, S. Onyshchenko, and K. Obertiur, "Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships," *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, no. 116, pp. 223-235, 2022. doi: **10.20858/sjsutst.2022.116.14**.
- [11] V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, V. Boyko, N. Shibaeva, and S. Konovalov, "Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 9 (84), pp. 4-11, 2016. doi: **10.15587/1729-4061.2016.85605**.
- [12] G.J. Tsekouras, F.D. Kanellos, and J. Prousalidis, "Simplified method for the assessment of ship electric power systems operation cost reduction from energy storage and renewable energy sources integration," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 5, no. 2, pp. 61-69, 2015. doi: **10.1049/iet-est.2013.0011**.
- [13] 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 Proc. of the 15th Int. Conf. «Transportation Science and Technology TRANSBALICA XV»*, Vilnius, Lithuania, Sept. 19-20, 2025, pp. 26-35. doi: **10.1007/978-3-031-85390-6_3**.

- [14] 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, no. 2, pp. 179-189, 2023. doi: 10.4271/14-13-02-0009.
- [15] A. Golovan, et al., "Enhancing information exchange in ship maintenance through digital twins and IoT: A comprehensive framework," *Computers*, vol. 13, no. 10, article 261, 2024. doi: 10.3390/computers13100261.

Стаття надійшла 12.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Гончарук І. П. Методичні основи формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 205-213. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351131>.

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 629.4.06

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351133

**STRUCTURAL ANALYSIS OF COMPRESSORS
OF TRACTION AND MULTIPLE UNIT ROLLING STOCK**

Fomin O.	D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2387-9946 , e-mail: fomin1985@ukr.net ;
Lohvinenko O.A.	PhD (Engineering), associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5731-7995 , e-mail: logvinenko.mpm@gmail.com ;
Vorokh A.O.	PhD (Pedagogy), associate professor, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7505-7616 , e-mail: vorokh@snu.edu.ua ;
Lutsenko O.A.	PhD (Engineering), associate professor, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1070-8887 , e-mail: lutsenko@snu.edu.ua

The article is devoted to a comprehensive analysis of the designs of compressors of traction and railcar rolling stock to identify their design features, principles of operation and determine areas for further improvement. Its purpose is a study aimed at systematizing existing design solutions of compressor equipment of railway transport and substantiating promising ways of modernization of pneumatic systems of modern rolling stock. The authors applied a systematic approach to studying the principles of operation of piston, screw, vane and trochoidal compressors, and conducted an analysis of technical documentation and a comparative assessment of their operational characteristics. It has been established that piston compressors remain the dominant types of compressor equipment used in traction and railcar rolling stock in Ukraine. From the consideration and analysis of the design of existing piston compressors, several of their shortcomings were identified, the main of which are: large mass-dimensional indicators, high energy consumption, significant vibration levels. The novelty of the conducted research is noted, which is characterized by the systematization of the advantages and disadvantages of various types of rotary compressors in relation to their potential application in railway transport. The analysis of the advantages of rotary compressors made it possible to substantiate the feasibility of their implementation to eliminate the above-mentioned disadvantages of piston compressors. The originality is highlighted by a comprehensive approach to the analysis of the problems of existing pneumatic systems and the justification of the directions of their modernization, considering modern technological achievements in the field of compressor construction. The prospects for the use of rotary compressors are noted and the need for further research in the direction of their adaptation to specific operating conditions in railway transport is identified. It is noted that the results of the study have significant practical value for railway transport specialists, as they create a theoretical basis for making informed decisions regarding the modernization of compressor equipment.

Keywords: transportation, mechanics, railway transport, transport technologies, rolling stock, repair, operation, reliability, compressors.

Statement of the problem

The current stage of development of railway transport in Ukraine requires constant improvement of its technical base. Its main components include traction (TRS) and multi-rail (MRRS) rolling stock, the key elements of which are compressors. It should be noted that their reliable and efficient operation directly affects the safety and productivity of railway transportation, and the wear of the existing compressor equipment fleet creates an urgent need for its modernization or replacement. At the same time, conducting a constructive analysis of compressors will allow identifying weaknesses in existing designs, and the results of research will become the basis for the development of more reliable and durable compressors (energy-efficient, low-noise, smaller in size and weight, high-quality, environmentally friendly, easy to maintain and repair). Therefore,

the constructive analysis of compressors for traction and multi-rail rolling stock is an urgent and timely task, and its successful implementation will contribute to increasing the competitiveness of Ukrainian railways at the national and international levels.

**Analysis of the latest achievements
on the identified problem**

In the work [1] factors affecting the traction energy consumption of electric trains were analyzed using data mining methods. A large dataset from real operations was collected. Key parameters influencing energy consumption – route, track profile, stop frequency – were identified. A prediction model for energy use was proposed. The results can be applied to optimize train schedules.

In the article [2] an integrated energy-efficient train operation approach based on the space-time speed network was presented. The model accounts for safety constraints, schedule adherence, and traction dynamics. Numerical experiments were conducted to validate the algorithm. The proposed approach enables energy savings of up to 12%. The methodology is recommended for integration into train control systems.

In the article [3] the technological development and trends of high-speed EMUs were investigated. The authors provided a historical overview of innovations in the field. Special attention was paid to aerodynamics, control systems, and safety. Key trends up to 2030 were forecasted. The importance of interdisciplinary engineering in EMU design was emphasized.

In the study [4] the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting hot agglomerate was substantiated. The finite element method was used to analyze the stress-strain state. A comparative analysis of conventional and modified designs was conducted. A reduction in structure weight without loss of strength was achieved. The results can be applied in serial production.

In the article [5] parameters of onboard capacitive energy storage systems for underground rolling stock were investigated. A theoretical model and experimental validation were proposed. Optimal characteristics for improving energy efficiency were determined. The analysis considered subway operation conditions. The results aim to reduce energy consumption and increase autonomy.

In the work [6] the dynamic loading on a semi-wagon fixed to a ferry deck using viscous coupling was analyzed. Modeling of the securing process and wave effects was performed. Critical stress modes were identified. Recommendations for improving securing safety were provided. The findings are important for maritime railway transportation.

In the article [7] a structural analysis of a freight wagon with composite walls was carried out. The stress-strain behavior under different loads was modeled. The authors demonstrated the feasibility of replacing steel parts with composites. Weight reduction was achieved without compromising strength. The use of composites is recommended for next-generation lightweight wagons.

In the study [8] the impact resistance of fiber-reinforced composite railway freight tanks was assessed. A series of impact experiments on composite materials was performed. Damage types under different impact speeds were analyzed. High energy absorption capacity of composites was confirmed. Such solutions are proposed for wagons carrying hazardous materials.

In the article [9] rational parameters for a capacitive energy storage system for underground transport were determined. A mathematical model for charge/discharge behavior was proposed. The influence of battery characteristics on system performance was analyzed. Simulation results were presented. The system is recommended for capturing braking energy.

In the work [10] vibratory stress and crack growth in a compressor blade under HCF loading were analyzed. Numerical analysis considered real operating conditions. Stress concentration zones and crack growth paths were identified. The results support fatigue life assessment. The study aims to improve the reliability of aerospace compressors.

In the article [11] performance analysis of a high-speed rotary compressor was conducted through experiments and mathematical modeling. A real-time measurement method was described. A model for efficiency and heat loss prediction was developed. The influence of rotation speed on performance was shown. The results are useful for optimizing industrial compressors.

In the study [12] durability of an open freight wagon body made of round pipes during ferry transportation was evaluated. A stress-based and fatigue analysis approach was used. Comparisons with traditional designs were made. Advantages of the tubular frame under vibration were shown. The study supports the design of ferry-resistant wagons.

In the work [13] a combination of operational modal analysis algorithms was used to identify modal parameters of a real centrifugal compressor. Multiple experimental methods were applied for model validation. Accurate values of natural frequencies and mode shapes were obtained. The combined approach improves resonance detection accuracy. The findings are valuable for rotating machinery diagnostics.

Purpose and task statement

The conducted analysis of literature sources revealed a noticeable shortage of in-depth studies devoted to the structural analysis of compressors of traction and multiple unit rolling stock. Existing works often consider issues of operation and maintenance, but do not delve sufficiently into the features of their internal structure and principles of operation. This creates a gap in understanding potential ways to optimize and improve these units. The lack of systematic structural analysis complicates the development of new, more efficient and reliable compressor units for railway transport. Thus, there is an urgent need to conduct targeted studies that will cover all aspects of the design of compressors of traction and multiple unit rolling stock, and their in-depth analysis will allow to identify reserves for increasing their productivity, reducing energy consumption and extending their service life.

Summary of the main material

Currently, the basis of air supply systems of modern TRS and MRRS in difficult operating conditions (significant vibrations and significant fluctuations in ambient temperature) are mainly piston compressors. The design features of these devices cause large mass-dimensional indicators and high energy consumption of the drive, while different operating conditions of compressors on diesel and electric locomotives lead to differences in their design. Thus, the design of the KT6ЭЛ compressor does not have

unloading devices in the suction valves of all three cylinders, which are necessary for switching the KT6 and KT7 compressors to idling. This is since the KT6ЭЛ compressor does not switch to idling but stops.

Fig. 1 shows the design of the valve box of the first stage cylinder of the KT6ЭЛ compressor. The valve box of the second stage cylinder has a similar structure. In an electric locomotive compressor, there is no need for a damper tank to eliminate fluctuations in the pressure gauge needle. This is since during 40...60 seconds of compressor operation (the approximate duration of one switching cycle), cold oil does not have time to fill the tank through the calibrated hole. With a longer switching duration, the low frequency of rotation of the crankshaft of the electric locomotive compressor and the oil pump shaft (440 rpm) do not give a noticeable pulsation of the oil pressure gauge needle, and the level of compressor vibration at such a shaft rotation frequency is insignificant.

To prevent the lubricant from freezing during winter operation, a tubular electric heater with a capacity of 200...260 W, operating at a voltage of 50 V, is placed in the crankcase of the electric locomotive compressor. Compressors KT6 and KT7 are not equipped with such a heater, since the required temperature in the engine compartment is provided by heat from the running diesel engine.

The KT7 compressor is characterized by a left-hand direction of rotation of the crankshaft (when viewed from the drive mechanism side) in contrast to the right-hand

rotation of the KT6 compressor. This feature required modification of the fan design to maintain the specified direction of cooling air movement: from the fan units to the cylinder and further to the refrigeration unit.

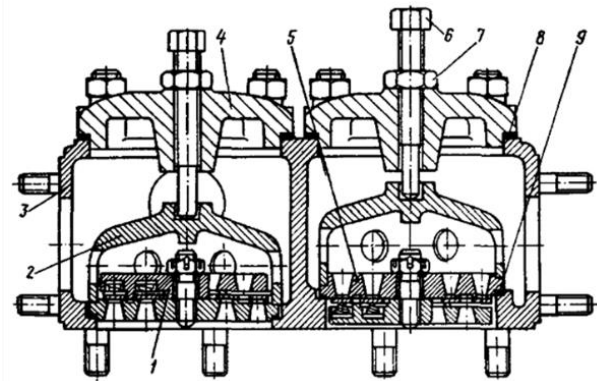


Fig. 1 – Valve box of the first stage cylinder of the KT6ЭЛ compressor: 1 – discharge valve; 2 – valve stop; 3 – case; 4 – cover; 5 – intake valve; 6 – clincher; 7 – locknut; 8 – paronite gasket; 9 – copper gasket

The principle of operation of these compressors is considered using the example of the KT6 compressor (Fig. 2).

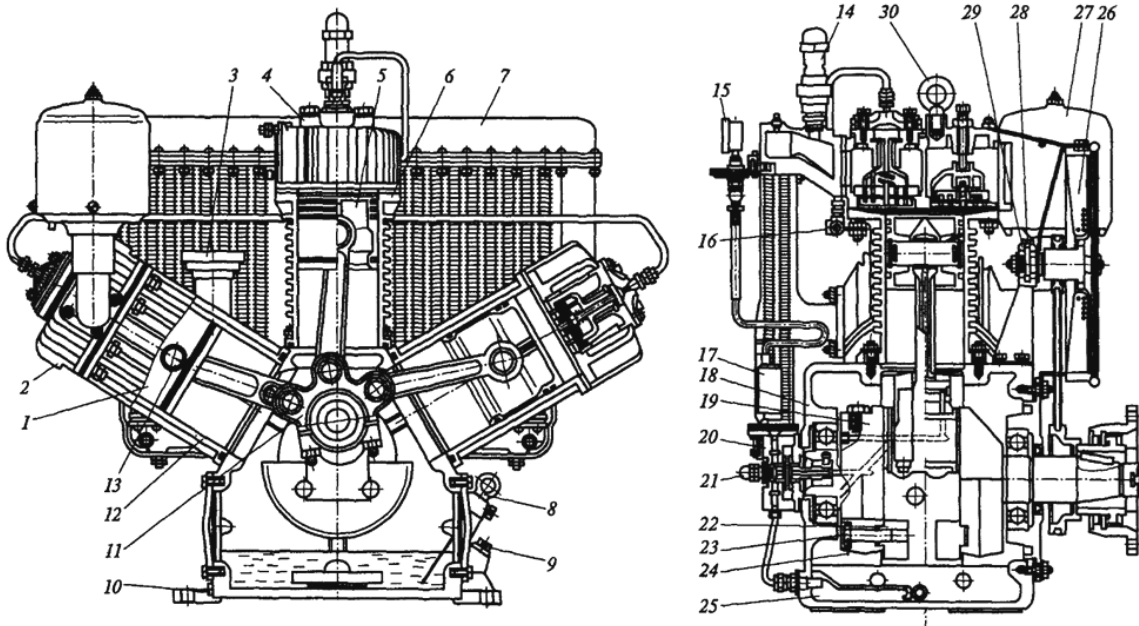


Fig. 2 – Compressor KT6: 1 – low pressure cylinder (LPC) piston; 2 – valve box LPC (first degree); 3 – breathalyzer; 4 – high pressure cylinder (HPC) valve box (second degree); 5 – piston HPC; 6 – HPC; 7 – refrigerator; 8 – oil dipstick (probe); 9 – oil filler plug; 10 – oil drain plug; 11 – connecting rod assembly; 12 – LPC; 13 – piston pin; 14 – safety valve; 15 – oil pressure gauge; 16 – tee for connecting the pipeline from the pressure regulator; 17 – tank for dampening pulsations of the pressure gauge needles; 18 – housing (crankcase); 19 – crankshaft; 20 – oil pump; 21 – pressure reducing valve; 22 – additional balancer; 23 – additional balancer mounting screw; 24 – cotter pin; 25 – oil filter; 26 – fan; 27 – air filter that sucks; 28 – fan belt tension adjustment bolt; 29 – fan bracket; 30 – eye bolt

Structurally, it consists of a housing 18, two low-pressure cylinders 12 (LPC), which have a camber angle of 120 degrees, one high-pressure cylinder 6 (HPC), a radiator-type cooler 7 with a safety valve 14, a connecting rod assembly 11 and pistons 1 and 5 of the LPC and HPC, respectively. When the piston of the first stage 2 moves to the bottom dead center (BDC), the air is rarefied in the working cavity of the cylinder between the piston bottom and the valve box, which is sucked into this cavity from the atmosphere through the filter 27 and the intake valves.

During the movement of the piston to the top dead center (TDC), air is compressed, which through the discharge valve and side pipes enters the upper collector of the refrigerator 7. This collector has an internal partition dividing it into two sections (Fig. 3). From the first section, the air moves along the cooling tubes into the lower collector, and then rises along the second row of tubes to the second section of the upper collector, connected to the suction cavity of the second-stage valve box.

When the piston of the second stage 5 moves to bottom dead center, cooled air, previously compressed in the first stage cylinder, is sucked into the cylinder through the intake valves.

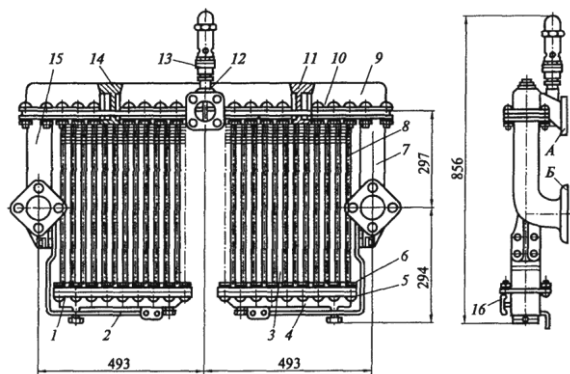


Fig. 3 – Radiator type compressor refrigerator KT6, KT7, KT6ЭЛ: 1,3 – radiator sections; 2,5 – connecting strips; 4 – bone bolt; 6,10,12 – flanges; 7,15 – branch pipes; 8 – copper tubes; 9 – upper collector; 11,14 – partitions; 13 – safety valve; 16 – drain cock; A,Б – flanges

When the piston of the second stage moves to TDC, additional compression of the air is carried out to a pressure slightly exceeding the pressure in the discharge line. When this pressure is reached, the discharge valve is activated, and the piston continues to supply compressed air to the storage tank. In parallel, different phases occur in the cylinders of the first stage: one sucks in atmospheric air, and the other performs initial compression with subsequent air direction to the cooler. The cylinder of the second stage provides the final air injection into the tank.

In the operating conditions of rolling stock, the KT6 compressor operates as follows: as soon as the air pressure in the tank reaches 0.85 MPa, the 3PД pressure regulator (Fig. 4) opens the access of air from the tank to the cavity above the rubber diaphragm 5 (Fig. 5) of the unloading

device of the valve boxes of the I and II stages. At the same time, the piston 3 will move to the BDC. At the same time, after the compression of the spring 7, the stop 6 will also drop down, which will press the small and large valve plates from the inlet valve seat with its fingers and the compressor will switch to idle operation. At the same time, the air in the refrigerator will be sucked in and compressed in the II stage cylinder, and in the I stage cylinder, air will be sucked in from the atmosphere and pushed back through the air filter. This process will be repeated until the minimum permissible pressure of 0.75 MPa is established in the tank, to which the regulator is adjusted. Then the pressure regulator will operate and connect the cavity above the rubber diaphragm 5 with the atmosphere, the spring 7 will lift the stop 6 up and after the valve plates are pressed against the seat, the compressor will switch to the working stroke.

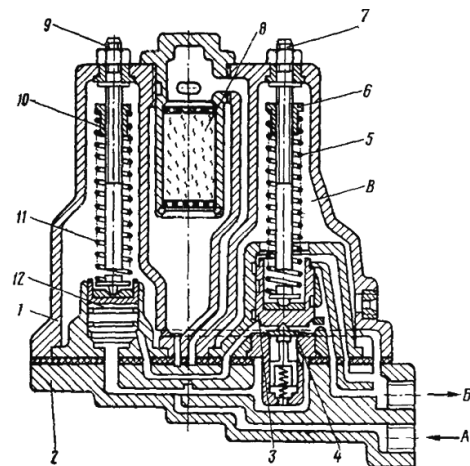


Fig. 4 – Pressure regulator 3PД: 1 – case; 2 – cover; 3 – valve that includes; 4 – check valve; 5 – valve spring, including; 6,10 – nut; 7 – valve spring screw; 8 – filter; 9 – shut-off valve spring screw; 11 – shut-off valve spring; 12 – shut-off valve; A – air from main tanks; Б – to compressor unloading devices; B – valve cavity

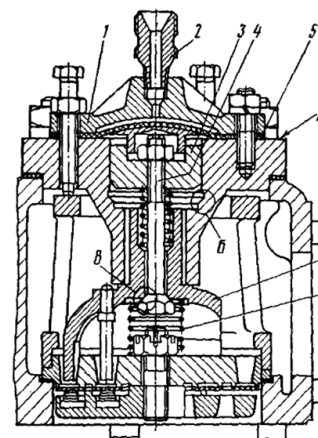


Fig. 5 – Unloading device for valve boxes of compressors KT6 and KT6: 1 – cover; 2 – fitting; 3 – piston; 4 – tie bolt; 5 – diaphragm; 6 – emphasis; 7 – spring

It is worth noting that modern traction and railcar rolling stock mainly uses piston compressors without compressed air-cooling systems. The cooling process takes place directly in the main tank, where condensation and sedimentation of the water-lubricant mixture occurs, which is periodically removed by drivers in manual mode. Insufficient purification of compressed air from moisture leads to undesirable phenomena in pneumatic systems: corrosion processes in air ducts and their icing during frosts. Such problems can cause serious failures of brake systems and pose a threat to the safe operation of railway transport.

In the context of the modernization of compressor equipment, a promising direction is the introduction of oil-free piston compressors. For example, in the industrial sector, such compressors have already been in operation for a long time. It is worth emphasizing that innovative oil-free compressors were created specifically for the railway industry by Knorr-Bremse.

As previously noted, piston compressors of modern traction and multi-rail rolling stock of Ukrzaliznytsia, with sufficient productivity and satisfactory operational reliability, are characterized by rather large mass-dimensional indicators and high levels of vibrations, which have a negative impact on people, as well as the reliability and durability of both the compressors themselves and the supporting elements of the rolling stock. Therefore, a rational direction for ensuring the required operational characteristics of air supply systems of modern rolling stock is to eliminate the indicated disadvantages of piston compressors by using rotary compressors (screw, single-rotor vane, trochoidal, etc.). The main advantages of rotary compressors include reduced vibration levels compared to piston compressors, reduced power consumption and mass-dimensional indicators.

For example, in screw compressors (Fig. 6), air compression is performed by a pair of interacting rotors with a certain number of spiral ribs.

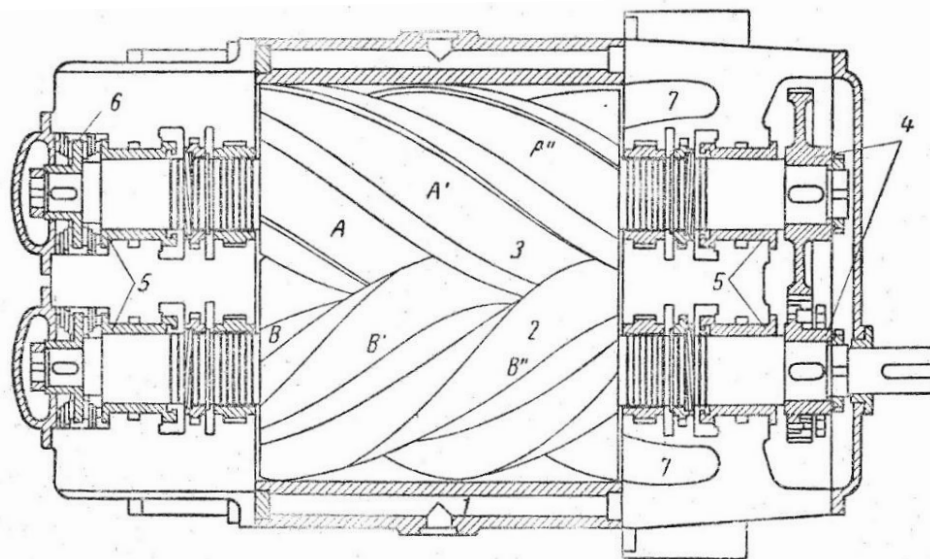


Fig. 6 – Twin-rotor screw compressor: 1 – case; 2 – driving rotor; 3 – driven rotor; 4 – gears; 5 – support bearings; 6 – thrust bearings; 7 – discharge window

The functional basis is to force the velocity of the compressed air medium in the inter-rotor cavity with its direction to the contact area of the screw ribs, where the minimum working chamber is formed. The outlet of the compressor unit is installed in this area. Prevention of leakage of compressed air during the compression process is realized through the maximum narrowing of the intervals between the planes of the ribs and the internal contours of the housing structure. The rotors are operated in the mode of mutual isolation and separation from the housing, which virtually eliminates mechanical wear of dynamic parts. The synchronization of rotational motion is provided by gears mounted on the rotor axes. In France, Germany, Switzerland, Belgium, Austria, and Italy, for example, screw compressors are considered the most promising for railway

rolling stock. An example of such a compressor is the SL20-5 screw compressor from Knorr Bremse. It has a capacity of 0.7...2 m³/min at an air pressure of 10 bar and a rotor speed of 1000...3500 rpm. The disadvantages of screw compressors (in relation to the conditions of operation on rolling stock) are the need to ensure high rotor speed, high noise level due to pressure fluctuations during suction and discharge, significant complexity of manufacturing and repair technology, compressed air losses through leaks, and in compressors filled with oil, there are significant impurities in the compressed air.

As for the single-rotor vane compressor, a feature of its design (Fig. 7) is that a cylindrical rotor is eccentrically mounted in its fixed cylindrical housing, in the radial grooves of which blades with the possibility of sliding are

installed. These blades divide the working volume into separate sealed chambers, and the injection occurs due to the change in their volumes. The advantages of these compressors include simplicity and reliability of the design (due to the absence of a valve assembly), uniformity of supply. Along with this, their main disadvantage is the sliding friction between the plates and the housing, which determines the release of a large amount of heat and intensive wear of the contacting surfaces, low efficiency, the cause of which is insufficient tightness of the working volumes.

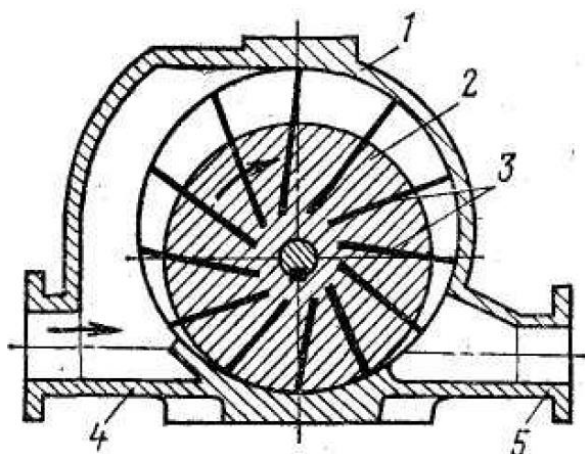


Fig. 7 – Structural scheme of the vane compressor: 1 – case; 2 – rotor; 3 – plates; 4 – suction pipe; 5 – discharge pipe

Trochoidal compressors (Fig. 8) have a fixed housing, inside which is located a rotor, which with its vertices is in contact with the inner trochoidal surface of the housing.

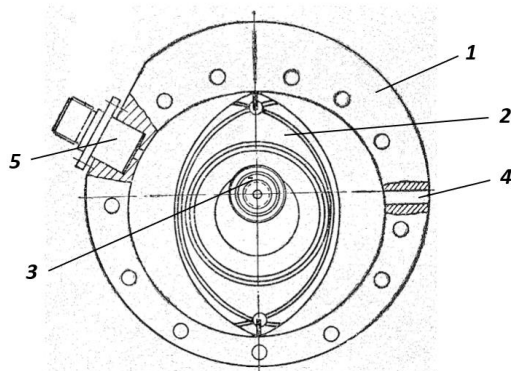


Fig. 8 – Schematic diagram of the trochoidal compressor: 1 – case; 2 – rotor; 3 – crankshaft; 4 – suction channel; 5 – discharge valve

The rotor performs a plane-parallel movement around the crankshaft and thus changes the volumes between the rotor and the housing, due to which the injection occurs. The main disadvantage of such compressors is the significant complexity of manufacturing the trochoidal surface, as well as high requirements for its wear resistance due to the too high speeds of relative movements of the sealing

elements of the rotor relative to the surfaces of the housing. Due to the high accuracy and hardness of the trochoidal surface, the design is not repairable. In addition, to eliminate vibration, it is necessary to additionally install balancers or manufacture the compressor with several sections. The experience of manufacturing trochoidal compressors is associated with significant material and technological difficulties and has not yet been widely implemented.

Conclusions

The analysis conducted in the article revealed a significant variety of design solutions for compressors used on TRS and MRRS, due to the specifics of their application and requirements for performance and reliability. It was established that piston compressors remain the dominant type in many series of rolling stock due to their relative simplicity, maintainability and ability to provide high pressure. A trend towards the growth of the use of rotary compressors was identified, which, with structural balance, small weight and dimensions and lower power consumption for their drive, will provide the corresponding systems of traction and multi-rail rolling stock with compressed air with the necessary performance and pressure indicators. It should be noted that the results of the study have significant practical value for railway transport specialists, as they create a theoretical basis for making informed decisions on the modernization of compressor equipment.

References

- [1] D. Frantasov, and Y. Kudryashova, "Information and measurement system for electric power losses accounting in railway transport," *Transportation Research Procedia*, vol. 54, pp. 552-558, 2021. doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.107.
- [2] J. Ren, Q. Zhang, and L. Feng, "Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining," *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, article 121374, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121374.
- [3] X. Wang, T. Tang, S. Su, J. Yin, Z. Gao, and N. Lv, "An integrated energy-efficient train operation approach based on the space-time-speed network methodology," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 150, article 102323, 2021. doi: 10.1016/j.tre.2021.102323.
- [4] H. Zhao, J. Liang, and C. Liu, "High-Speed EMUs: Characteristics of technological development and trends," *Engineering*, vol. 6, iss. 3, pp. 234-244, 2020. doi: 10.1016/j.eng.2020.01.008.
- [5] I. Bondarenko, T. Campisi, G. Tesoriere, and L. Neduzha, "Using detailing concept to assess railway functional safety," *Sustainability*, vol. 15, iss. 1, article 18, 2023. doi: 10.3390/su15010018.
- [6] O. Fomin, A. Lovska, I. Skliarenko, and Y. Klochkov, "Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate," *Eastern-European Journal of*

- Enterprise Technologies*, vol. 1/7(103), pp. 65-74, 2020. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193408.
- [7] 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.
- [8] O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskyi, H. Holub, I. Kozarchuk, and V. Kharuta, "Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck," *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 2, no. 7(98), pp. 6-12, 2019. doi: 10.15587/1729-4061.2019.160456.
- [9] A.I. Patrascu, A. Hadar, and S.D. Pastrama, "Structural analysis of a freight wagon with composite walls," *Materiale Plastice*, vol. 57(2), pp. 140-151, 2020. doi: 10.37358/MP.20.2.5360.
- [10] G.E. Street, P.J. Mistry, and M.S. Johnson, "Impact resistance of fibre reinforced composite railway freight tank wagons," *Journal of Composites Science*, vol. 5(6), article 152, 2021. doi: 10.3390/jcs5060152.
- [11] O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky, P. Khozia, and V. Ishchenko, "Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock," *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 2, no. 1(92), pp. 63-71, 2018. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080.
- [12] L. Li, T. Yu, B. Shang, B. Song, and Y. Chen, "Analysis of vibratory stress and crack growth of compressor blade under HCF loading," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 23, pp. 1326-1343, 2023. doi: 10.1007/s11668-023-01680-1.
- [13] C. Zheng et al., "Performance analysis for a rotary compressor at high speed: Experimental study and mathematical modeling," 2024, arXiv:2407.11080v1. doi: 10.48550/arXiv.2407.11080.
- [14] O. Fomin et al., "Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry," *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, vol. 21, no. 1, pp. 28-34, 2019. doi: 10.26552/com.C.2019.1.28-34.
- [15] L.O. Zague, D.A. Castello, and C.F.T. Matt, "Combination of operational modal analysis algorithms to identify modal parameters of an actual centrifugal compressor," 2024, arXiv:2407.07273v1. doi: 10.48550/arXiv.2407.07273.

КОНСТРУКТИВНИЙ АНАЛІЗ КОМПРЕСОРІВ ТЯГОВОГО ТА МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

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 ;
Логвіненко О.А.	канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5731-7995 , e-mail: logvinenko.mpm@gmail.com ;
Ворох А.О.	канд. пед. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7505-7616 , e-mail: vorokh@snu.edu.ua ;
Луценко О.А.	канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1070-8887 , e-mail: lutsenko@snu.edu.ua

Стаття присвячена проведенню комплексного аналізу конструкцій компресорів тягового та моторвагонного рухомого складу для виявлення їх конструктивних особливостей, принципів функціонування та визначення напрямків подальшого вдосконалення. Її метою є дослідження, спрямоване на систематизацію існуючих конструктивних рішень компресорного обладнання залізничного транспорту та обґрунтування перспективних шляхів модернізації пневматичних систем сучасного рухомого складу. Авторами використано системний підхід до вивчення принципів роботи поршневих, гвинтових, лопатевих та трохойдних компресорів, а також проведено аналіз технічної документації та порівняльну оцінку їх експлуатаційних характеристик. Встановлено, що поршневі компресори залишаються домінуючими типами компресорного обладнання, яке використовується на тяговому та моторвагонному рухомому складі України. З розгляду та аналізу конструкції існуючих поршневих компресорів було виявлено ряд їх недоліків, основними з яких є: великі масогабаритні показники, високе енергоспоживання, значні рівні вібрації. Відзначено новизну проведеного дослідження, яка характеризується систематизацією переваг і недоліків різних типів роторних компресорів щодо їх потенційного застосування на залізничному транспорті. Проведений аналіз переваг роторних компресорів дозволив обґрунтувати доцільність їх впровадження для усунення вищенаведених недоліків поршневих компресорів. Оригінальним виділено комплексний підхід до

аналізу проблем існуючих пневматичних систем та обґрунтування напрямків їх модернізації з урахуванням сучасних технологічних досягнень у галузі компресоробудування. Зазначено перспективність застосування роторних компресорів та визначено необхідність подальших досліджень у напрямку їх адаптації до специфічних умов експлуатації на залізничному транспорті. Відмічено, що результати дослідження мають значну практичну цінність для фахівців залізничного транспорту, оскільки створюють теоретичну основу для прийняття обґрунтованих рішень щодо модернізації компресорного обладнання.

Ключові слова: перевезення, механіка, залізничний транспорт, транспортні технології, рухомий склад, ремонт, експлуатація, надійність, компресори.

Перелік використаних джерел

- [1] Frantasov D., Kudryashova Y. Information and measurement system for electric power losses accounting in railway transport. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. Pp. 552-558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.107>.
- [2] Ren J., Zhang Q., Feng L. Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 262. Article 121374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121374>.
- [3] An integrated energy-efficient train operation approach based on the space-time-speed network methodology / X. Wang et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Vol. 150. Article 102323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102323>.
- [4] Zhao H., Liang J., Liu C. High-Speed EMUs: Characteristics of technological development and trends. *Engineering*. 2020. Vol. 6, iss. 3. Pp. 234-244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.01.008>.
- [5] Using detailing concept to assess railway functional safety / Bondarenko I., Campisi T., Tesoriere G., Neduzha L. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, iss. 1. Article 18. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010018>.
- [6] Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate / Fomin O., Lovska A., Skliarenko I., Klochkov Y. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1/7(103). Pp. 65-74. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>.
- [7] 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>.
- [8] Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 2, no. 7(98). Pp. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.193408>.
- [9] Patrascu A. I., Hadar A., Pastrama S. D. Structural analysis of a freight wagon with composite walls. *Material Plastic*. 2020. Vol. 57(2). Pp. 140-151. DOI: <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360>.
- [10] Street G. E., Mistry P. J., Johnson M. S. Impact resistance of fibre reinforced composite railway freight tank wagons. *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5(6). Article 152. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>.
- [11] Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2, no. 1(92). Pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
- [12] Analysis of vibratory stress and crack growth of compressor blade under HCF loading / L. Li et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2023. Vol. 23. Pp. 1326-1343. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01680-1>.
- [13] Performance analysis for a rotary compressor at high speed: Experimental study and mathematical modeling / C. Zheng. arXiv:2407.11080v1. 2024. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.11080>.
- [14] Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry / O. Fomin et al. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, no. 1. Pp. 28-34. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.28-34>.
- [15] Zague L. O., Castello D. A., Matt C. F. T. Combination of operational modal analysis algorithms to identify modal parameters of an actual centrifugal compressor. arXiv:2407.07273v1. 2024. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.07273>.

Стаття надійшла 28.02.2025

Стаття прийнята 19.03.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Structural analysis of compressors of traction and multiple unit rolling stock / Fomin O., Lohvinenko O. A., Vorokh A. O., Lutsenko O. A. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 214-221. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351133>.

274 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.113.004.67

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351134

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ
АВТОТРАКТОРНИХ ДИЗЕЛІВ І РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ
ПАЛИВНОГО НАСОСУ ВИСОКОГО ТИСКУ**

Худяков І.В.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Грицук І.В.	д-р техн. наук, професор, Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820 , e-mail: grytsuk_iv@ukr.net ;
Погорлецький Д.С.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Дзигар А.К.	ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5947-6263 , e-mail: anatoliidzygar@gmail.com ;
Аксьонова О.О.	асистент, Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9768-9542 , e-mail: aksonova@stu.cn.ua

У сільському господарстві питання підвищення ефективності експлуатації двигунів внутрішнього згоряння, зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт паливної апаратури удосконаленням методів та засобів їх діагностування є актуальним через старіння парку рухомого складу сільського господарства та нестачу інвестицій. Аналіз відомих систем, які використовуються на теперішній час, а також двигунів автотранспортних засобів на дизельному паливі, показав, що однією з найбільш поширених систем є система розділеного типу з багатоплунжерним паливним насосом високого тиску. Діагностування таких систем трудомісткі та не мають достатньої точності. Математичні моделі, які описують роботу паливних насосів високого тиску, мають велику кількість параметрів, які впливають на динамічні зміни показників тиску дизельного палива. Аналіз матеріалів опублікованих статей показав недостатність інформації щодо питань кількісного впливу показників та функцій чутливості зміни параметрів будь якої математичної моделі на результати моделювання, недостатньо рекомендацій щодо динаміки зміни ступеня чутливості та використання у системі значень кожного з параметрів. Підвищення якості діагностики паливної апаратури дизельного двигуна неможливо при використанні тільки одного методу діагностування. Однією з задач є зниження частки помилкового діагностування, а також покращення економічних показників під час експлуатації мобільної техніки сільськогосподарського призначення, його ремонту та технічного обслуговування. Метою даної роботи є розробка математичної моделі паливного насоса високого тиску на основі аналізу сучасних методів діагностування паливної апаратури автотракторних дизелів. Таким чином, розроблені на основі аналізу сучасних методів діагностування модель та схема є орієнтиром для проектування та розрахунку паливного насоса високого тиску. Як результат, маємо зниження помилкових висновків під час діагностики та зниження витрат, які забезпечують працездатність парку рухомого складу сільського господарства за рахунок правильного технічного обслуговування і ремонту.

Ключові слова: методи діагностування, паливна апаратура автотракторних дизелів, математична модель паливного насоса високого тиску, зниження витрат на технічне обладнання.

Постановка проблеми

Економічні показники, що характеризують кількість витрат, що забезпечують працездатність парку рухомого складу сільського господарства, перевищують вартість нових, у процентному значенні – 20...25 % собівартості експлуатації, до 40% з яких займає частка технічного обслуговування (ТО) і ремонту (Р). Тому повне і своєчасне задоволення потреб агропромислового комплексу країни в сільськогосподарській техніці має вирішуватися в тому числі і шляхом підвищення ефективності експлуатації рухомого

складу, причому проблема повинна розглядатися комплексно з обґрунтуванням стратегій ТО і Р, у взаємозв'язку з програмами ТО і Р [1-3].

Для вирішення цього питання потрібно не тільки забезпечити агропромисловий комплекс (АПК) сільськогосподарською технікою з високими показниками надійності та технологічності, а й мати сервісні служби, які удосконалюють методи технічної експлуатації та проведення ТО і Р [4].

Збільшуються витрати на підтримку працездатності мобільної техніки, значна частина яких припадає на технічні обслуговування та ремонт паливної апаратури

дизелів [5, 6]. У зв'язку з цим, діагностування паливної апаратури автотракторних дизелів для підтримки в технічно справному стані парку мобільної сільськогосподарської техніки є актуальним завданням [1, 4, 7-8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання вдосконалення алгоритмів технічного діагностування паливної апаратури автотракторних дизелів та їх інтеграції з системами управління дизелем недостатньо досліджено. Вдосконалення діагностування сучасних конструкцій паливної апаратури (ПА) автотракторних дизелів здійснюється збільшенням кількості параметрів, що діагностуються. Істотна частина автотракторної техніки має термін експлуатації понад 7 років та оснащена розділеною системою подачі палива з механічним багатоплунжерним паливним насосом високого тиску (ПНВТ).

За даними дослідників ПА, в сучасних умовах експлуатації на один дизель автотракторного засобу припадає від 2 до 3 тонн перевитраченого палива на рік, з одночасним збільшенням викидів в атмосферу шкідливих компонентів на 100-150 кг та 30-50 кг – СН [9, 10]. Крім того, несправність ПА призводить до зниження пускових, тягових, економічних та екологічних властивостей дизеля.

Своєчасне діагностування парку рухомого складу

сільського господарства, виявлення поломок та несправностей дає можливість знизити кількість відмов, в наслідок чого скоротити витрати на їх обслуговування [11]. Методи діагностування паливної апаратури дизелів, що набули поширення [9], потребують зняття вузла з двигуна з розборкою та регулюванням. Також розробляються нерозбірні методи діагностування елементів системи живлення автотракторних дизелів, досліджених недостатньо глибоко [5, 6]. Відомі методи діагностування дизельної ПА можна розбити на групи: діагностування за показниками роботи двигуна; діагностування за характеристиками роботи ПА; діагностування за параметрами ПА [9].

Найбільш поширеним з представлених є перший метод діагностування, що використовує основні показники роботи дизельного двигуна. При його застосуванні діагностика проводиться по непрямим ознакам, що потребує високої кваліфікації механіка-діагноста та не виключає помилкового діагнозу. Ознаки порушення роботи автотракторного дизеля ПА при діагностуванні даним методом представлені в таблиці 1.

Також поширені такі методи, як інструментальний контроль техніко-економічних показників дизельного двигуна, одним з найактуальніших є безгальмівний метод професора Ждановського Н.С., метод визначення потужності дизельного двигуна в залежності від пробіга та парціальний метод [9].

Таблиця 1

Ознаки порушення роботи ПА дизельного двигуна та необхідні технічні впливи

Зовнішні ознаки (симптоми) порушення нормальної роботи	Структурні зміни взаємодіючих елементів
Двигун працює нестійко Запуск двигуна утруднений	Паливна система не герметична
Двигун глухне чи не розвиває достатньої потужності	Фільтруючі елементи паливних фільтрів засмічені
Двигун глухне, не розвиває достатньої частоти обертання колінчастого вала	Відмова у роботі паливного насоса
Двигун працює нерівномірно і не розвиває потужності	Засмічення фільтрів форсунок
Двигун не розвиває необхідної потужності, димний випуск	Закоксовування продувних вікон гільзи циліндрів
Утруднений пуск та нерівномірна робота двигуна	Порушення нормальної роботи форсунок
Нерівномірна та «жорстка» робота двигуна, випуск чорного кольору	Порушення кута випередження упорскування палива
Нерівномірна робота двигуна зі стуками та димним випуском	Порушення регулювання рейок паливного насоса
Двигун надмірно збільшує частоту обертання, йде «врознос»	Порушення роботи регулятора
Двигун не розвиває потужності, очищувач повітря темне масло	Забруднення очищувача повітря

Сутність парціального та безгальмівного методів полягає у відключенні частини циліндрів працюючого дизеля, що забезпечує сприйняття працюючими циліндрами додаткового навантаження, що виникає від механічних втрат, що виробляються у відключених циліндрах. В даному випадку потужність циліндра, що діагностується, визначається за кількістю оборотів двигуна. Одночасно контролюється витрата палива робочими циліндрами.

Мета статті

Метою даної роботи є розробка математичної моделі паливного насоса високого тиску на основі аналізу сучасних методів діагностування паливної апаратури автотракторних дизелів.

Виклад основного матеріалу

Для діагностування ПА інструментальними методами використовується декілька алгоритмів оцінки відмов працездатності системи дизеля за наступним математичним виразом:

$$|Y_i(t) - Y_{ier}(t)| \leq \Delta_{idop}, \quad (1)$$

де $Y_i(t)$ і $Y_{ier}(t)$, відповідно, вихідні змінні i -тої підсистеми контролю та еталонної діагностичної моделі; Δ_{idop} – допустима величина неузгодженості.

Даний алгоритм обробки даних використовується при роботі дизеля на статичних режимах. В силу малого розкиду значень контрольованих змінних у статичному режимі роботи дизеля, за ними обчислюються статистичні оцінки, значення яких порівнюються з еталонними в базі даних, сформованої експертом.

Для діагностування циліндрів дизельного двигуна під час роботи, які працюють нерівномірно, використовується такий метод, як ідентифікація. Це пов'язано з причиною нерівномірності, яка не обов'язково є наслідком роботи ПА. Також може впливати технічний стан самого двигуна. У алгоритмі теоретичного обґрунтування параметрів діагностування використані вже відомі характеристики динамічного розрахунку дизельного двигуна [7]. Особливості цього алгоритму наведені як функціональна схема (Рис. 1).

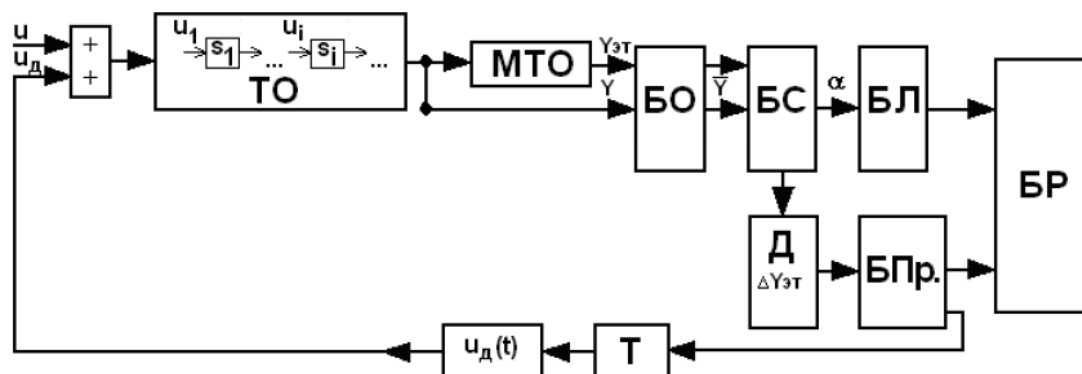


Рис. 1 – Функціональна схема алгоритму методу ідентифікації при діагностиці дизеля: u – керуючі дії; ТО – технічний об'єкт діагностування, дизель; МТО – пряма модель технічного об'єкта, дизеля як об'єкта діагностування; БО – блок первинної обробки; БС – блок судження; Д – блок нормативних допусків; БЛ – блок логіки; БПр. – Блок прогнозування; БР – блок реєстрації результатів діагностування; Т – таймер; u_d – зондуючий сигнал для тестування

Математичні моделі, які описують роботу паливних насосів високого тиску, використовують дуже багато параметрів, це впливає на показники якісної динаміки управління значення тиску дизельного палива. Не дивлячись на це, після аналізу літератури, присвяченої цьому питанню, зрозуміло, що оцінка ступені кількісного впливу, показники та функції впливу змінних параметрів математичної моделі на результат моделювання практично відсутні. Аналіз матеріалів опублікованих статей показав недостатність інформації щодо питань кількісного впливу показників та функцій чутливості зміни параметрів будь якої математичної моделі на результати моделювання, недостатньо рекомендацій щодо динаміки зміни ступеня чутливості та використання у системі значень кожного з параметрів. Підвищення якості діагностики паливної апаратури дизельного двигуна неможливо при використанні

тільки одного методу діагностування. Як результат можемо мати зниження помилкових висновків під час діагностики та зниження витрат, які забезпечують працездатність парку рухомого складу сільського господарства за рахунок правильного ТО і Р [12-14].

Попередні дослідження математичних моделей процесів у плунжерній парі ПНВТ показали дуже високий вплив на результати моделювання тиску коефіцієнта стисливості дизельного палива, коефіцієнта кінематичної в'язкості, зазору в плунжерній парі, швидкості руху плунжера. У цьому зв'язку були сформульовані наступні завдання теоретичного дослідження: розробити математичну модель процесів стисливості палива в плунжерній парі ПНВТ дизеля, кількісно оцінити вплив значень коефіцієнтів стисливості та кінематичної в'язкості дизельного палива, величини зазору в плунжерній парі моделювання процесів у ПНВТ.

Для виключення впливу процесів, що протікають в інших елементах системи паливоподачі дизеля, доцільно розглядати їх диференційовано. Тому на першому етапі дослідження розглядається лише один з елементів математичної моделі системи паливоподачі дизеля – математична модель процесу стисливості в одній плунжерній парі. При закритому виході ПНВТ продуктивність плунжерної пари, що розвивається, – подача дизельного палива переходить до витоку по щілині між втулкою і плунжером. При моделюванні використовувалися такі припущення: подача плунжерної пари відповідала витоку зазору між плунжером і втулкою; значення коефіцієнта динамічної в'язкості та стисливості змінюються із зростанням тиску палива над плунжером; не враховується перепад тисків у нагнітальному клапані насоса через невелику кількість його в порівнянні з тисками, що створюються в системі паливоподачі при впорскуванні.

Враховуючи коефіцієнт стисливості палива, диференціальне рівняння, що описує процес зміни тиску над плунжером насоса високого тиску, має вигляд [9]:

$$\alpha_m(P) V_p(\varphi) dp/dt = f_p C_p + Q_{PH}, \quad (2)$$

де $\alpha_m(P)$ – коефіцієнт стисливості палива, (1/МПа); $V_p(\varphi)$ – об'єм порожнини над плунжером (м³); f_p – площа перерізу плунжера ПНВТ (м²); C_p – миттєва швидкість плунжера насоса, (м/с); p – тиск палива над плунжером, (МПа); t – час, (с); Q_{PH} – об'ємна витрата витоку через щілину плунжер-втулка ПНВТ (м³/с); φ – кут повороту розподільчого валу дизеля, (°).

При моделюванні використовувалася експериментальна таблична залежність значень переміщення плунжера (h_p) ПНВТ від кута повороту (φ) розподільчого валу дизеля 16ЧН26/26. Інтерполяція табличної залежності переміщення плунжера від кута повороту розподільчого валу (φ) була отримана з використанням чисельного методу обчислювальної математики кубічної сплайн-інтерполяції.

Значення швидкості (v_p) та прискорення (a_p) плунжера розраховувалися чисельним диференціюванням інтерполяційної табличної залежності переміщення плунжера (h_p) кутом повороту (φ) розподільчого валу ТНВД.

При розрахунку відносних значень переміщення (h_p), швидкості (v_p) та прискорення (a_p) плунжера були використані їх максимальні значення відповідно $h_{p\max} = 0,022$ м. при $\varphi = 56^\circ$ п.р.в.; $v_{p\max} = 2,017$ м/с при $\varphi = 23^\circ$ п.р.в.; $a_{p\max} = 0,383$ м/с² при $\varphi = 19^\circ$ п.р.в.

Рівняння об'ємної витрати палива в зазорі по пару плунжер-втулка ПНВТ має наступний вигляд [9]:

$$Q_{PH} = \pi \beta_e \Delta p^2 \delta^3 d \ln(c_\mu) / (12 p_0 \delta \mu_{TO} l (c_\mu^{\Delta p/p_0} - 1)) \pm \pm (\pi u d \delta/2), \quad (3)$$

де δ – величина кільцевого зазору, (м); u –

швидкість плунжера ПНВТ (м/с); d і l – відповідно, діаметр та довжина втулки, (м); β_e – поправочний коефіцієнт ексцентричності сполучення (від 1,15 до 1,4); $\Delta p = p_p - p_0$ – перепад тисків в ущільненні (МПа); $c_\mu = 1,0025$ – коефіцієнт з постійним значенням.

У рівнянні (3) враховується зміна коефіцієнта динамічної в'язкості від тиску p_p над плунжером ПНВТ [9]:

$$\mu_{TP} = \mu_{TO} c_\mu^{p/p_0}. \quad (4)$$

Відомі різні залежності коефіцієнта кінематичної в'язкості палива від температури. Коефіцієнти динамічної (μ_{TP}) та кінематичної (ν) в'язкості дизельного палива пов'язані між собою:

$$\nu = \mu_{TP} / \rho_T, \quad (\text{м}^2/\text{с}) \quad (5)$$

де ρ_T – щільність дизельного палива (кг/м³).

За табличними даними експериментальної залежності кінематичної в'язкості (ν) дизельного палива від температури (T_T) [14], побудована регресійна залежність, яка має такий вигляд:

$$\nu_p = a + c \log(T_T) + d \log(T_T)^2, \quad (6)$$

де $a = 0.76149543$; $c = -0.36487040$; $d = 0.043988593$; ν_p – розрахункова кінематична в'язкість дизельного палива.

Регресійна залежність (6) кінематичної в'язкості (ν) дизельного палива від його температури (T_T) наведено на рис. 2.

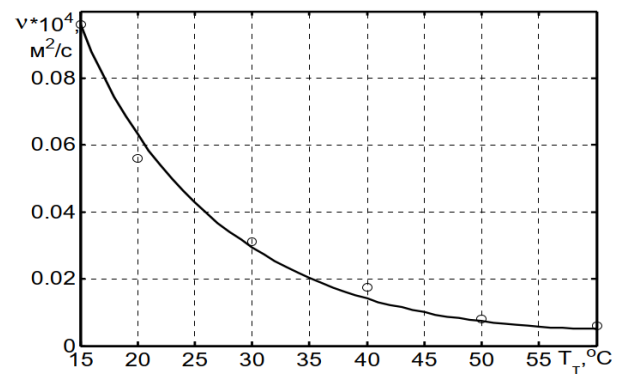


Рис. 2 – Залежність кінематичної в'язкості (ν) дизельного палива від його температури (T_T): $\circ$ – дані експерименту; — – розрахунок за регресійною моделлю

За аналітичними залежностями побудована структурна схема узагальненої математичної моделі в середі візуального графічного програмування Simulink (Рис. 3).

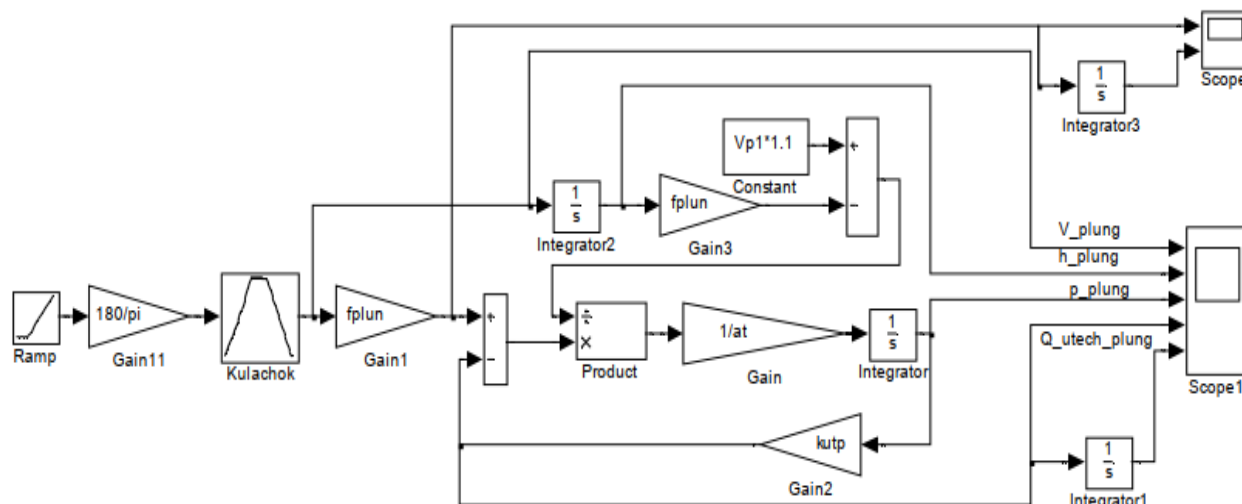


Рис. 3 – Структурна схема математичної моделі ТНВД із замкнутим виходом (прикладна програма Simulink)

Висновки

Таким чином, розроблені на основі аналізу сучасних методів діагностування модель та схема є орієнтиром для проектування та розрахунку паливного насоса високого тиску. Як результат, маємо зниження помилкових висновків під час діагностики та зниження витрат, які забезпечують працездатність парку рухомого складу сільськогосподарства за рахунок правильного ТО і Р. У статті обґрунтовано розробку математичної моделі паливного насоса високого тиску на основі аналізу сучасних методів діагностування паливної апаратури автотракторних дизелів.

Перелік використаних джерел

- [1] The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018-01-1773. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
- [2] Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel / A. Golovan et al. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 23-25 Sept. 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896595>.
- [3] Koch F.W., Haubner F.G. Cooling System Development and Optimization for DI Engines. *SAE Technical Paper Series*. 2000. № 2000-01-0283. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>.
- [4] Low-heat rejection engines – a concept review / Churchill R.A., Smith J.E., Clarc N.N., Turton R.A. *SAE Technical Paper Series*. 1989. № 890153. Pp. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.4271/880014>.
- [5] Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В.П. Матейчик та ін. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Вип. 13. С. 126-138.
- [6] Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*. 2018-01-1738. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
- [7] Features of the subject area of the information model of the system of remote monitoring of the technical condition and modes of operation of the truck / I. Gritsuk et al. *German International Journal of Modern Science*. 2021. № 9. Pp. 53-58. DOI: <https://doi.org/10.24412/2701-8369-2021-9-1-53-58>.
- [8] Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems) / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2020-01-2031. 2020. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>.
- [9] Construction of systemic interaction between tools of remote monitoring of the technical condition and operation modes of a truck vehicle / I. Gritsuk et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 3(127). Pp. 47-63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298843>.
- [10] Кадицьникова Т. М. Моніторинг технологічного стану як фактор забезпечення безаварійної роботи. *Вісник Донбаської академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва*. 2002. № 5(36). С. 38-41.
- [11] Information Security Risk Management of Vehicles / D. Klets et al. *SAE Technical Paper*. 2018-01-0015. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>.
- [12] Худяков І.В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. *Наукові нотатки*. 2019.

Вип. 67. С. 141-148. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22>.

- [13] Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

[14] Positive Energy District Replication – Case Study of the City of Trenčín, Slovakia / V. Ondrejčka et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1203(2). Article 022087. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/2/022087>.

ANALYSIS OF METHODS FOR DIAGNOSING FUEL EQUIPMENT OF AUTO TRACTOR DIESEL ENGINES AND DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A HIGH-PRESSURE FUEL PUMP

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 ;
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 ;
Pohorletsky D.S.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Dzygar A.K.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5947-6263 , e-mail: anatoliidzygar@gmail.com ;
Aksonova O.O.	assistant, Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9768-9542 , e-mail: aksonova@stu.cn.ua

In agriculture, the issue of increasing the efficiency of internal combustion engines, reducing costs for maintenance and repair of fuel equipment by improving methods and means of their diagnosis is relevant due to the aging of the agricultural rolling stock and lack of investment. Analysis of known systems currently used, as well as diesel engine vehicles, showed that one of the most common systems is a split-type system with a high-pressure multi-plunger fuel pump. Diagnosis of such systems is laborious and does not have sufficient accuracy. Mathematical models that describe the operation of high-pressure fuel pumps have a large number of parameters that affect dynamic changes in diesel fuel pressure. Analysis of the materials of published articles showed a lack of information on the quantitative impact of indicators and sensitivity functions of changes in the parameters of any mathematical model on the results of modeling, there are not enough recommendations on the dynamics of changes in the degree of sensitivity and the use of each parameter in the system of values. Improving the quality of diagnostics of diesel engine fuel equipment is not possible when using only one diagnostic method. One of the tasks is to reduce the proportion of false diagnoses, as well as improve economic indicators during the operation of mobile agricultural machinery, its repair and maintenance. The purpose of this work is to develop a mathematical model of a high-pressure fuel pump based on the analysis of modern methods for diagnosing fuel equipment of truck and tractor diesel engines. Thus, the model and scheme developed on the basis of the analysis of modern diagnostic methods are a guideline for the design and calculation of a high-pressure fuel pump. As a result, we have a reduction in erroneous conclusions during diagnostics and a reduction in costs, which ensure the operability of the agricultural rolling stock fleet through proper maintenance and repair.

Keywords: diagnostic methods, fuel equipment of auto-tractor diesel engines, mathematical model of a high-pressure fuel pump, reduction of costs for technical equipment.

References

- [1] I. Gritsuk et al., "The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units," *SAE Technical Paper*, 2018-01-1773, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1773**.
- [2] 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 2019 IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Sept. 23-25, 2019, pp. 390-393. doi: **10.1109/MEES.2019.8896595**.
- [3] F.W. Koch, and F.G. Haubner, "Cooling System Development and Optimization for DI Engines," *SAE Technical Paper Series*, № 2000-01-0283, 2000. doi: **10.4271/2000-01-0283**.
- [4] R.A. Churchill, J.E. Smith, N.N. Clarc, and R.A. Turton, "Low-heat rejection engines – a concept review," *SAE Technical Paper Series*, № 890153, pp. 25-36, 1989. doi: **10.4271/880014**.
- [5] V.P. Mateichyk, V.P. Volkov, P.B. Komov, I.V. Gritsuk, A.P. Komov, and Ju.V. Volkov, "Osoblyvosti monitorynhu stanu transportnykh zasobiv z vykorystanniam bortovykh diahnostychnykh kompleksiv" ["Features of monitoring of vehicles

- state with using of board diagnostic complexes”], *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka – Project management, systems analysis and logistics*, vol. 13, pp. 126-138, 2014.
- [6] V. Vychuzhanin et al., “Cognitive Model of the Internal Combustion Engine,” *SAE Technical Paper*, 2018-01-1738, 2018. doi: 10.4271/2018-01-1738.
- [7] I. Gritsuk et al., “Features of the subject area of the information model of the system of remote monitoring of the technical condition and modes of operation of the truck,” *German International Journal of Modern Science*, № 9, pp. 53-58, 2021. doi: 10.24412/2701-8369-2021-9-1-53-58.
- [8] I. Gritsuk et al., “Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems),” *SAE Technical Paper*, 2020-01-2031, 2020. doi: 10.4271/2020-01-2031.
- [9] I. Gritsuk et al., “Construction of systemic interaction between tools of remote monitoring of the technical condition and operation modes of a truck vehicle,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 3(127), pp. 47-63, 2024. doi: 10.15587/1729-4061.2024.298843.
- [10] T.M. Kadylnykova, “Monitorynh tekhnolohichnoho stanu yak faktor zabezpechennia bezavariinoi roboty” [“Monitoring of technological status as a factor in ensuring trouble-free operation”], *Visnyk Donbaskoi akademii budivnytstva i arkhitektury. Tekhnolohiia, orhanizatsiia, mekhanizatsiia ta heodezychno zabezpechennia budivnytstva – Bulletin of the Donbass Academy of Civil Engineering and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction*, № 5(36), pp. 38-41, 2002. (Ukr.)
- [11] D. Klets et al., “Information Security Risk Management of Vehicles,” *SAE Technical Paper*, 2018-01-0015, 2018. doi: 10.4271/2018-01-0015.
- [12] I.V. Khudiakov, “Modeli bazy danykh informatsiinoi systemy monitorynhu parametriv tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv” [“Monitoring information system database models vehicle technical parameters”], *Naukovi Notatki*, vol. 67, pp. 141-148, 2019. doi: 10.36910/6775.24153966.2019.67.22.
- [13] O.V. Zakalov, and I.O. Zakalov, *Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: Navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of Friction and Wear in Machinery: A Textbook]. Ternopil, Ukraine: Ternopil Ivan Puluj National Technical University Publ., 2011. (Ukr.)
- [14] V. Ondrejicka, M. Hajduk, L. Jamecny, M. Husar, and M. Jasso, “Positive Energy District Replication – Case Study of the City of Trencin, Slovakia,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1203(2), article 022087, 2021. doi: 10.1088/1757-899x/1203/2/022087.
- Стаття надійшла 23.09.2025
Стаття прийнята 17.10.2025
Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Аналіз методів діагностування паливної апаратури автотракторних дизелів і розробка математичної моделі паливного насоса високого тиску / І.В. Гріцук та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 222-228. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351134>.

275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.615.072:658.8:005.1

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351135

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОГО СУХОГО ПОРТУ: СИСТЕМНЕ БАЧЕННЯ У ТРИАДІ «HINTERLAND-SEAPORT-FORELAND»

Кириллова О.В. д-р техн. наук, професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3414-7364>, e-mail: kirillova18@i.ua;
Ромак В.Л. здобувач ступеня PhD, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-0041>, e-mail: romakhvalentina@gmail.com

Статтю присвячено систематизації термінологічних, функціональних та концептуальних підходів до визначення поняття «сухий порт» (dry port) у взаємозв'язку з морським портом та іншими виробничими транспортними об'єктами. Показано, що інтенсивність і глибина вітчизняних досліджень за даною тематикою суттєво відстають від світового наукового дискурсу, а термінологічне поле dry port характеризується високим ступенем фрагментованості. На основі контент-аналізу міжнародних і національних джерел виокремлено понад 40 варіантів термінологічних інтерпретацій, які описують сухий порт через множини споріднених об'єктів: мультимодальний термінал, тиловий вантажний термінал, логістичний хаб, багатофункціональний логістичний центр, внутрішній термінал, внутрішній митний склад, інтермодальний термінал, розширений шлюз тощо. Застосування формалізованого апарату логічних відношень ($=$, $\subset$, $\supset$, $\not\subset$, $\vee$, $\wedge$, $\cap$) дозволило описати, як у різних дослідженнях dry port може розглядатися еквівалентом, підмножиною, надмножиною, функціональним замінником або протиставлятися морському порту. Показано відмінності між вітчизняними та закордонними підходами: українські дослідники переважно тяжіють до інтерпретації сухого порту як «мультимодального» вузла з домінуванням митного функціоналу, тоді як міжнародний дискурс фокусується на «інтермодальному» dry port як ключовому компоненті зв'язку глобальної торгівлі, який інтегрує форленди (forelands) та внутрішні (регіональні) сполучення. На основі структурно-функціонального аналізу, логічного моделювання термінологічних відношень та порівняльного аналізу світових кейсів (ЄС, Китай, Індія, США) розроблено авторську концептуальну модель інтегрованого сухого порту (Integrated Dry Port Conceptual Model, 2025). У межах цієї моделі dry port трактовано як інтермодальний внутрішній термінал, технологічно інтегрований із морським портом та включений у просторово-функціональну систему «хінтерленд–морський порт–форленд», у якій він виконує комплекс виробничих, митних, сервісних і додаткових функцій та виступає каталізатором регіонального розвитку портів хінтерлендів. Запропонована концептуальна модель формує цілісну теоретичну рамку для подальшої адаптації та впровадження dry port як інструмента підвищення конкурентоспроможності вітчизняних морських портів у глобальному торговельному середовищі.

Ключові слова: сухий порт (dry port), морський порт (seaport), хінтерленд, форленд, інтермодальний термінал, регіоналізація, концепція.

Постановка проблеми

Вимоги до ефективності транспортних процесів, пов'язаних з уніфікацією вантажних одиниць (контейнеризації зокрема), створили передумови появи нових формувань в галузі та призвели до появи нової термінології. Одним з варіантів реалізації даного запиту до ефективності транспортних процесів є вихід функцій порту за межі портової території та забезпечення своєчасної доставки вантажних одиниць до внутрішніх регіонів країн. З цим пов'язано початок створення різноманітних об'єктів поза межами морських портів, які мають як різний функціонал, так і термінологію (назву). До цього переліку відноситься значна кількість об'єктів, наприклад: контейнерні депо, контейнерні станції, митні термінали, внутрішні мультимодальні термінали, технопарки та сухі порти в тому числі. В різних джерелах функції об'єктів з різною

термінологічною назвою дублюються. І навпаки – начебто подібні або навіть ідентичні за назвою об'єкти можуть бути визначні як об'єкти з радикально відмінним функціоналом. Сам термін «сухий порт» вперше застосований у ЮНКТАД у 1982 році як «внутрішній термінал...» до 2020-х років еволюціонував до іншої термінології – «інтермодальний термінал», «логістичний вузол» тощо, та в залежності від країни розташування розрізняється масштабами, складністю улаштування, спеціалізацією.

Відповідно і переосмисленню підходів до портівого управління з налаштуванням функціональної спрямованості, яка б виходила за межі традиційного периметра морського порту, мінливості ролі проміжних вузлів в ланцюгах постачання, регіоналізації портової діяльності на основі форленду присвячена низка робіт закордонних авторів, таких як [1, 2]. Хоча сучасні принципи та догми роботи світової портової галузі

узагальнено та формалізовано в [3], перманентно відбувається пошук оптимізації шляхів портового управління в даному контексті, до якого приєднуються і вітчизняні науковці. Так в [4, 5] сформульована необхідність концентрації на концепті регіоналізації при формуванні конкурентності вітчизняних портів на ринку портових послуг; досліджено динаміку трансформації операторів контейнерних терміналів у глобальній торгівлі та надано оцінку рівня їх технологічної зрілості.

Таке переосмислення зміни ролі портів та поява інших об'єктів, таких як «сухий порт», сприяють підвищенню ефективності і конкурентності портового виробництва, але термінологічна та функціональна неузгодженість потребують подальшого узгодження, структуривання та систематизації. Закордонними дослідниками термін «сухий порт» використовується як компонент зв'язку глобальної торгівлі, що поєднує форленди та внутрішні (регіональні) сполучення, в тому числі забезпечує перехід від одного способу транспортування укрупнених вантажних одиниць (контейнерів) до іншого, виконуючи інтермодальну функцію. В той же час в вітчизняних наукових та виробничих колах зацікавленість до «сухого порту» знижена, пріоритетно використовується в даному контексті термін «мультимодальний», що в свою чергу обмежує їх функціонал.

Таким чином, встановлення та систематизація термінологічних відмінностей у визначенні поняття «сухий порт», визначення особливостей кореляції між об'єктами «сухий порт» / «морський порт», встановлення особливостей функціонального навантаження при визначенні даних об'єктів є актуальними задачами в контексті оптимізації портового управління та виведення вітчизняних портових послуг на конкурентні позиції у глобальному торговельному середовищі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Широка дискусія, здебільшого закордонних науковців, щодо «сухих портів» спостерігається протягом останніх двадцяти років. Різні дослідники вивчали розрізнено як окремі «сухі порти», так і локальні групи таких об'єктів. Вирізняються роботи [6-9] з встановлення класифікації внутрішніх вузлів в рамках визначення «сухий порт» відповідно: відстані до морських портів та внутрішніх вузлів ланцюгів постачання; концепції супутникових терміналів, перевантажувальних та вантажних центрів; принципів розташування на кордонах та вздовж транспортних коридорів; набору функціональних вимірів; суб'єкта, що керує розвитком терміналів тощо.

Значна кількість інформації сконцентровано в роботах [10, 11], де не тільки класифіковані типи терміналів, висвітлені питання рентабельності їх впровадження, впливу на навколишнє середовище тощо, але й визначені та освітлені еволюція та принципи дослідження концепції «сухого порту» та його функціональне навантаження.

Робота [12], ґрунтуючись на низці попередніх досліджень, сфокусована на «...maritime-oriented dry ports...», що мають зв'язок з мінімум одним морським портом. В свою чергу дане дослідження відповідно з [13] обмежене рівнем контейнерного терміналу – не нижче ICD (Inland container depot – англ. – внутрішнє контейнерне депо) при визначенні параметрів сухих портів через вплив на них схем, функцій та транспортного забезпечення сухих та морських портів та їх сполук з метою подальшого розвитку таких транспортних вузлів в інтересах зацікавлених сторін. Так, в процесі дослідження, авторами [12], спираючись на фокус-групу внутрішніх транспортних вузлів (більше 100 об'єктів в світі), встановлено, що термін «сухий порт» це термін, який найчастіше використовується при описі об'єктів даного типу (більше 27%), а найпопулярнішим функціональним типом даних об'єктів є рівень логістичного центру – 67,6%.

Водночас широка спільнота закордонних авторів притримується повної або часткової ідентичності терміну «сухий порт» з терміном «інтермодальний термінал» в різних варіаціях, наприклад роботи [11, 14-16] тощо.

В той же час у вітчизняних науковців та практиків галузі немає єдиної думки щодо наявності та функціональної наповненості «сухих портів». Деякі автори наприклад [17, 18], притримуються думки, що сухий порт це «мультимодальний логістичний центр із розвинутою інфраструктурою...», але в той же час висувуються і радикально протилежні ідеї [18, 19], де мультимодальний термінал і «сухий порт» – це виключно різні поняття.

Тож до основних проблем, встановлених в процесі огляду останніх досліджень та публікацій можна віднести:

- широкий спектр термінології визначення концепту «сухий порт»;
- невизначеність у функціональному навантаженні об'єктів даного типу;
- практика розгляду «сухих портів» окремо від поняття «морський порт»;
- фіксований рівень стану контейнерного терміналу «морського порту» при дослідженні взаємодії з «сухим портом» часто без регіональної адаптації;
- відмінності у трактуванні між вітчизняними та закордонними науковими поглядами.

Все це потребує подальшого встановлення та систематизації термінологічних відмінностей у визначенні поняття «сухий порт», визначення особливостей його кореляції з об'єктом «морський порт», встановлення особливостей функціонального навантаження для подальшої оптимізації управління підприємствами морського транспорту в сучасних ринкових умовах.

Мета статті

Відповідно до широкого спектру проблем, пов'язаних з трактуванням та функціональним навантаженням «сухого порту», метою даної роботи є:

- дослідження еволюції концепту «сухий порт» («dry port», DP);

- встановлення та систематизація основних термінів, що вживаються в процесі еволюції концепту, із визначенням їх термінологічних особливостей;

- встановлення кореляції між термінами «сухий порт» та «морський порт» на основі порівняльного аналізу;

- визначення функціонального навантаження об'єктів відповідного типу залежно від систематизованої термінології;

- розробка авторської концептуальної моделі інтегрованого «сухого порту» як каталізатора регіонального розвитку вітчизняних морських портів у глобальному торговельному середовищі.

Методологічною основою роботи є поєднання якісних та формалізованих методів аналізу. Структура дослідження ґрунтується на:

- контент-аналізі міжнародних та національних наукових джерел, що дозволив виокремити понад 40 варіантів термінологічних інтерпретацій поняття «dry port»;

- класифікаційному аналізі, у межах якого сформовано структуру термінологічних відповідностей між DP та пов'язаними елементами портової й транспортної інфраструктури;

- структурно-функціональному підході, застосованому для ідентифікації та порівняння функціонального наповнення dry port із морським портом, інтермодальним терміналом та концепцією extended gate;

- методі логічного моделювання, що забезпечив побудову матриці термінологічних відношень ($=$, $\supseteq$, $\subset$, $\not\subset$, $\vee$, $\cap$) і створення передумов для розробки концептуальної моделі інтегрованого dry port;

- порівняльному аналізі світових кейсів (ЄС, Індія, Китай, США), спрямованому на ідентифікацію практик інтегрованого розвитку морських і сухих портів;

- методі концептуального узагальнення, який дав змогу сформулювати теоретичні засади для подальшої побудови авторської концептуальної моделі інтегрованого «сухого порту».

Виклад основного матеріалу

Визначення «сухий порт» використовувалась на тих об'єктах галузі, на які було винесено багато робіт, які традиційно виконувалися в морських портах – митне оформлення, зберігання, перетарювання, перевалка з одного виду транспорту на інший, надання послуг з реалізації заходів, направлених на створення додаткової вартості, тощо.

Перша згадка про сухий порт з'являється у професійних галузевих виданнях у 1980 р. [20], де термін

використано для опису об'єкта, який вирішує проблеми перезавантаженості контейнерних портів шляхом перерозподілу вантажопотоків, що надходять морем. Через шість років згадка про це явище з'являється і у інших наукових виданнях, наприклад, в [21], де сухі порти відносяться до багатфункціональних логістичних центрів з множиною компаній, що діють в одному осередку не акцентуючись на сполученні з морськими портами та без визначення спектру послуг, що пропонуються на терміналах.

В Матеріалах конференцій ООН з торгівлі та розвитку (UNCTAD) визначення терміну «сухий порт» з'явилося перше у 1982 р. [22], а через десятиліття (1991 рік) в Конвенції ООН з морського права [23] було запропоноване наступне визначення поняття «сухий порт»: «внутрішній термінал, в якому судноплавні компанії видають свої власні імпорتنі коносаменти для імпорتنих вантажів, беручи на себе повну відповідальність за витрати та умови, і з якого судноплавні компанії видають свої власні коносаменти на експортні вантажі».

Вивчаючи роботи вітчизняних авторів в період 2020-2023 роки бачимо наступне. За ствердженням [20] термін «сухий порт» (Dry Port) вважається аналогом терміну «припортовий термінал», «...це певне місце, що обов'язково розташовано осторонь від моря, де, проте, виконується частина робіт, властивих морським портам». В тому ж [24] наводиться думка міжнародних експертів, що «сухий порт» це «...депо для проходження митних процедур, розташоване осторонь морського порту, щоб позбавити порт цього навантаження» та вказують, що таке формулювання вважається основним в міжнародній практиці.

За [25] «Сухий порт» (англ. Dry port) – це сукупність складів тимчасового зберігання, допоміжних будівель, споруд, автомобільних і залізничних шляхів, майданчиків, розташованих за межами території морського порту, пов'язаних між собою і з портом єдиним технологічним процесом та інформаційною системою для здійснення вантажних операцій з товарами та їх тимчасового зберігання під митним контролем». За ствердженням автора «...створення тилового вантажного терміналу – «сухого порту» є «...сучасним способом збільшення пропускної та переробної спроможності морських портів в умовах територіальних обмежень, а також ефективним інструментом зниження нерівномірності внутрішніх вантажопотоків порту», для якого характерні функції зберігання, консолідації та комплектації вантажів, митне оформлення, технічне обслуговування автомобільних і залізничних транспортних засобів.

В [26] визначено, що створення тилового вантажного терміналу – «сухого порту» є сучасним способом збільшення пропускної та переробної спроможності морських портів, створення інфраструктурних можливостей для експорту в умовах блокади українських морських портів, а також даний об'єкт визначається

ефективним інструментом зниження нерівномірності внутрішніх вантажопотоків порту.

За думкою [18] «сухий порт, або логістичний хаб – це мультимодальний логістичний центр із розвинутою інфраструктурою, яка дозволяє власнику вантажу користуватися всіма перевагами морського порту на суші». З даним формулюванням погоджуються і автори джерела [17]. Водночас в [18] наводиться і протилежна думка, що «мультимодальний термінал і сухий порт – це виключно різні поняття і головною ознакою сухого порту є те, що він має спільну територію з морським портом і має один пункт пропуску з основним портом», що, на думку автора, забезпечує свободу переміщення вантажів у різних митних режимах із морського порту до сухого порту для здійснення подальших операцій із вантажем.

В дослідженні [19] вказано на досвід вітчизняної та міжнародної практик, де перший сприймає мультимодальні термінали прототипами «сухих портів», а другий визначає між цими двома поняттями істотні відмінності. А саме – «сухі порти» повинні мати спільну територію з морським портом і один пункт пропуску з основним портом, що дозволяє задіяти різні види транспорту та різні митні режими при переміщенні вантажів. При цьому, мультимодальні термінали можуть не мати прямого виходу до морського порту.

За [27] «сухий порт» – метод вдосконалення системи митного оформлення та контролю для розвантаження морських та річкових портів для прискорення вантажообігу. «Сухий порт», за визначеннями, наданими в [27], – режим взаємодії двох терміналів, портового і сухопутного... не пов'язаний безпосередньо з морем, але є як би філією іншого порту в традиційному його призначенні (іноді така філія може перебувати навіть на території зарубіжної держави, причому на значній відстані). При цьому в складі «сухого порту» має бути «...внутрішній контейнерний термінал – сукупність складу тимчасового зберігання, інші будівлі, споруди, автомобільні і (або) залізничні колії та інші об'єкти, розташовані за межами території морського порту, пов'язані між собою і з морським портом єдиним технологічним процесом, призначеним для здійснення вантажних операцій з товарами і їх тимчасовим зберіганням під митним контролем».

В роботах вітчизняних спеціалістів суміжних галузей, наприклад [28, 29], також присутні дослідження щодо концепту «сухий порт», але в контексті виробничих, організаційних, інформатизованих процесів в роботі суміжних видів транспорту, митниці, прикордонних пунктів, їх розміщення тощо.

Вивчаючи закордонний досвід динаміки розвитку концепції сухого порту, відштовхуючись від [10, 11], фокусуємось на еволюції самого терміну «сухий порт» та його функціоналу з ціллю визначення «фарватеру» (шляхів) оптимізації роботи морського порту, структуруючи дані з подальшою адаптацією під регіональні особливості та з урахуванням мовних розбіжностей.

Так у роботі [14] автори використовують визначення сухого порту у значенні внутрішнього митного складу, наголошуючи на його важливість в забезпеченні концепції наскрізного транспортування, просуваючи інтермодальний транспорт та підкреслюючи користь для навколишнього середовища.

Основні функції сухого порту, такі як перевантаження вантажів (між двома режимами); консолідація вантажу для транспортної підготовки; складування вантажу; доставка та логістичний контроль потоків, сформульовані в роботі [30], де впроваджується поняття «супутникових установок/терміналів» для зберігання контейнерів у порядку, щоб знову пережити затори на терміналах морських портів. В роботі підкреслюється актуальність інтермодального транспорту для розвитку внутрішніх терміналів для зниження перевантаженості портів і визначення функціоналу.

Вживання терміну «вантажний вузловий термінал», що забезпечує перевалку з одного режиму на інший, а також допоміжні послуги (склади, митниця, майстерні з технічного обслуговування, страхові офіси тощо), застосовано в роботах [31-33]. При цьому автори встановили, що визначення об'єктів такого типу при однаковій концепції різняться в залежності від країни, та в [31] пропонується класифікація інтермодальних терміналів.

За [1] побудований або оновлений інтермодальний термінал ототожнюється з поняттям внутрішній порт (матеріально-технічна та сервісна діяльність). Подібною структурою визначається поняття Інтермодальний індустріальний парк, відмінністю визначення якого є подання його як термінальну споруду у безпосередній близькості (не розташований разом).

В [11] виокремлюються три основних типи інтермодальних терміналів: термінали морського порту, залізничні термінали та розподільчі центри, кожен з яких має своє місце розташування та свої вимоги до обладнання. Розгляд переваг та недоліків «сухих портів» з різною класифікацією розташування (далеке, середнє, близьке) наводяться в роботах [7, 8, 14, 15, 33, 34].

Визначення сухого порту безпосередньо як внутрішнього інтермодального терміналу, пов'язаного з морським портом (портами) з великою пропускнуою спроможністю транспортних засобів, переважно залізницею, де клієнти можуть залишити/забрати свої одиниці так, ніби безпосередньо в морському порту, надано в [15]. В роботі надається як класифікація сухих портів залежно від їх функцій і розташування, так і відбувається доповнення [31] спектром послуг – технічне обслуговування контейнерів, митне оформлення та інші послуги з доданою вартістю, спрямовуючи фокус на економію транзитних витрат і просування регіональної економічної діяльності та створюючи чисельні переваги для учасників транспортних систем. Надається твердження авторів «...для повністю розвинутої концепції «сухого порту» морський порт або судноплавні компанії контролюють операції на залізничному транспорті»

В роботі [35], в подовження [15], представлена концепція розширених воріт, де «розширені шлюзи – це внутрішній інтермодальний термінал, безпосередньо з'єднаний з терміналами морського порту транспортними засобами великої місткості, де клієнти можуть залишати або забирати свої перевантажувальні одиниці, ніби безпосередньо з морського порту, і де портовий термінал може контролювати потік контейнерів до та з внутрішнього терміналу». Тобто ворота не виходять за рамки ідеї «сухого порту». Намагається встановити можливість сталого інтермодального транспорту шляхом інтеграції різних видів транспорту. За [35] сухі порти відрізняються від інших терміналів головним чином, забезпечуючи високопродуктивний доступ як до морських портів, так і в зворотному напрямку.

В [36] представлене міркування щодо типу сухих портів «ззовні всередину», тобто «сухий порт», «розроблений адміністрацією порту, операторами портових терміналів або океанськими перевізниками». В [12] встановлена кореляція між параметрами морського та сухого порту.

Докладний огляд створення та розвитку сухих портів / інтермодальних терміналів в світі надано в багатьох роботах, наприклад в [34, 3, 16, 37, 38].

Регіональний вплив сухих портів на економіку країн наведено в роботах [39, 40], де сухий порт розглянуто як внутрішній регіон, куди переміщено внутрішній портовий інтерфейс та встановлено підвищення регіонального розвитку через використання наявної інфраструктури та збільшення обсягів торгівлі; заявлено роль сухого порту як каталізатора регіонального розвитку та як важеля збільшення транзитного вантажопотоку. І тут вже у вітчизняних авторів [41]

аналогічним чином розмежовуються підходи «до функціонування... портових терміналів з урахуванням нормативно-правових і організаційних аспектів їх діяльності».

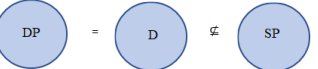
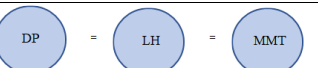
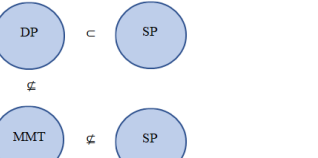
В свою чергу інвестиційна складова у формуванні сухих портів висвітлена в [42], де було запропоновано державно-приватне партнерство у якості інвестиційного механізму фінансування розвитку сухих портів з урахуванням форми інвестування та визначення сторін підтримки ціноутворення. Вплив на продуктивність досліджувався через оптимізацію розкладу трансферу між сухими портами та морськими портами в [43, 44], через оптимізацію витрат для зацікавлених сторін, включаючи встановлення, зберігання та транспортні витрати [43]. Розглядалися і можливості регіонального розвитку навколо сухих портів, розширення лінійки послуг з додатковою вартістю, висвітлені проблеми прямого залізничного сполучення з морським портом зі встановленням потреб в допоміжній політиці [34, 45]. Аналіз джерел, пов'язаних з питаннями впливу «сухих портів» на навколишнє середовище та рентабельності їх впровадження, надано в роботах [3, 11].

Отже, є очевидним не тільки те, що поняття «сухий порт» є досить молодим концептом, але й те, що більшість досліджень, реалізованих закордонними авторами, за продуктивністю наукової активності випереджають вітчизняну науку майже на двадцять років [3, 11, 46] та мають відмінний підхід до термінологічних визначень та функціонального наповнення об'єктів даного типу.

Так в таблиці 1 наведено «еволюцію» концепту «сухий порт» в дослідженнях, спираючись на наведену вище інформацію.

Таблиця 1

Еволюція концепту «сухий порт»

№ джерела	Скорочення	Співвідношення з морським портом (SP), =, $\supseteq$, $\not\supseteq$, $\vee$, $\wedge$, $\subset$	Функції		
			митні	виробничі	додаткові
19, 24	DP=MMT		1	1	1
24	DP=D		1	0	0
25, 26	DP=RST		1	1	1
18, 19	DP=LH= MMT		0	1	1
18, 19	DP $\neq$ MMT		1	1	1

Продовження таблиці 1

№ джерела	Скорочення	Співвідношення з морським портом (SP), =, $\supseteq$, $\not\supseteq$, $\vee$, $\wedge$, $\subset$	Функції		
			митні	виробничі	додаткові
27	DP $\supseteq$ RST	DP $\supseteq$ RST $\not\supseteq$ SP	0	0	0
17, 18, 21	DP=MLC	DP = MLC $\not\supseteq$ SP	0	1	1
23	DP=IT	DP = IT $\not\supseteq$ SP	0	1	1
30	DP=ICW	DP = ICW $\not\supseteq$ SP	0	1	1
31	DP=SF/(V, $\wedge$)CST	DP = SF/(V, $\wedge$)CST $\not\supseteq$ SP	1	1	1
32, 33	DP=FM/(V, $\wedge$)IMT	DP = FM/(V, $\wedge$)IMT $\not\supseteq$ SP	1	1	1
1, 14, 33, 34, 11	DP=IMT	DP = IMT $\not\supseteq$ SP	1	1	1
35	DP $\subset$ AGW	DP $\subset$ AGW $\cap$ SP	1	1	1

Нижче надано скорочення та символи, що були використані в даній таблиці.

Скорочення: сухий порт (DP); морський порт (SP); мультимодальний термінал (MMT); депо (D); тиловий вантажний термінал (RST); логістичний хаб (LH); багатофункціональний логістичний центр (MLC); внутрішній термінал (IT); внутрішній митний склад (ICW); супутникові установки/термінали для зберігання контейнерів (SF/CST); вантажний вузловий термінал/інтермодальний термінал (FM/IMT); розширений шлюз (AGW). **Символи:** знак рівності «=», не дорівнює « $\neq$ », надмножина (включення можливе повне або часткове) « $\supseteq$ », не є множиною (протиставлення) « $\not\supseteq$ », строга підмножина « $\subset$ », логічне «АБО» (ORE) « $\vee$ », логічне «І» (AND) « $\wedge$ », перетиння « $\cap$ ».

поняття можуть мати різні комбінації відношень із поняттям «морський порт» (SP) (таблиця 3):

- протиставлятися морському порту (« $\not\supseteq$ », стовпчик 1);

Таблиця 2

Термінологічні відмінності/особливості: DP / ...

	«Сухий порт» (DP)			
	«=»	« $\not\supseteq$ »	« $\supseteq$ »	« $\subset$ »
	1	2	3	4
1.D, MLC, LH, IT, ICW, IMT, SF/CST, FM/IMT	=			
2.MMT	=	$\not\supseteq$		
3.RST	=		$\supseteq$	
4.AGW				$\subset$

Таблиця 3

Термінологічні відмінності/особливості: DP (...) / SP

	Морський порт (SP)			
	« $\not\supseteq$ »	« $\subset$ »	« $\vee$ »	« $\cap$ »
	1	2	3	4
1.MMT, D, RST, LH, ICW, SF/CST	$\not\supseteq$			
2.DP	$\not\supseteq$	$\subset$		
3.MLC, IT, IMT, FM/IMT	$\not\supseteq$	$\subset$	$\vee$	
4.AGW				$\cap$

- бути його підмножиною (« $\subset$ », стовпчик 2);

- повноцінно замінювати морський порт у певних функціях (« $\vee$ », стовпчик 3);

Результати та їх обговорення

Підсумовуючи отримані дані було отримано такі результати.

Перше. За проведенням дослідженням «сухий порт» відповідно аналізованих джерел (таблиця 2):

- ототожнюється з термінологічно іншим об'єктом («=», стовпчик 1);

- протиставляється термінологічно іншому об'єкту (« $\not\supseteq$ », стовпчик 2);

- виступає надмножиною або еквівалентом іншого об'єкту (« $\supseteq$ », стовпчик 3);

- є підмножиною іншого об'єкту (« $\subset$ », стовпчик 4).

Друге. На основі аналізу термінологічних відповістей об'єкт «сухий порт» та пов'язані з ним

- перетинатися з морським портом за функціональним наповненням («П», стовпчик 4).

Третє. В сучасніших дослідженнях більшість авторів ототожнюють термін «сухий порт» (через декілька ітерацій) з термінами та функціями «інтермодального» та «мультимодального» терміналу. Термін «сухий порт» використовуються закордонними дослідниками як компонент зв'язку глобальної торгівлі, що поєднує форленди та внутрішні (регіональні) сполучення, в тому числі забезпечує перехід від одного способу транспортування великотоннажних контейнерів до іншого виконуючи інтермодальну функцію, тобто користуються терміном «інтермодальний». В

вітчизняних роботах зацікавленість до «сухого порту» знизька, порівняно з закордонними дослідженнями, пріоритетно використовується термін «мультимодальний» та, здебільшого, такі об'єкти обмежені митним функціоналом.

Проаналізувавши отримані результати, наведені в таблицях 1-3, стає очевидним (рис. 1), що об'єкти FH/IMT, IMT та AGW дорівнюють або є структурною підмножиною об'єкту «сухий порт», водночас перетинаються з об'єктом «морський порт» та/або можуть повноцінно його замінити, зберігаючи виробничі, митні та додаткові функції.



Рис. 1 – Узагальнення отриманих результатів

Отримані результати демонструють істотну термінологічну фрагментованість, функціональну неоднорідність та відсутність єдиного підходу до визначення змісту та меж поняття «сухий порт». Встановлені відношення між DP та спорідненими об'єктами (таблиці 1-3) підтверджують непослідовність трактувань: у різних джерелах dry port розглядається як еквівалент, надмножина, підмножина або навіть заміник морського порту.

Така різновекторність інтерпретацій унеможливає формування узгодженої теоретичної рамки та створює потребу у концептуалізації dry port як цілісної наукової категорії.

Четверте: Авторська концептуальна модель інтегрованого сухого порту (Integrated Dry Port Conceptual Model, 2025). Сухий порт – це інтермодальний внутрішній термінал, технологічно інтегрований з морським портом, у межах якого відтворюється частина його виробничих, митних, експедиторських та інших пов'язаних із цим операцій транспортного сервісу, що забезпечують безперервність та узгодженість єдиного технологічного процесу транспортування

вантажів. Запропонована модель є концептуальною, оскільки формує цілісну систему уявлень про сухий порт як наукову категорію. Вона описує сутнісні характеристики об'єкта через:

- структуру концептуальних елементів (визначення, просторові межі, функціональні складові);
- систему принципів (інтермодальність, технологічна інтеграція, функціональна повнота, регіональний каталіз, заміщення та комплементарність);
- міжелементні зв'язки (хінтерленд–порт–форленд, DP–SP взаємодія, перенесення функцій).

Така логічно впорядкована конструкція дозволяє інтерпретувати dry port як інтегровану інфраструктуру та функціональну підсистему глобального ланцюга транспортування. Запропонована концептуальна модель ґрунтується на таких принципах:

1. Принцип інтермодальності та просторової зв'язності хінтерленд (hinterland) ↔ морський порт (seaport) ↔ форленд (foreland). Сухий порт (dry port) функціонує як інтермодальний вузол (intermodal node), що забезпечує стандартизований технологічний перехід між видами транспорту та формує просторово

єдину систему: хінтерленд (hinterland)-морський порт (seaport)-форленд (foreland). Dry port розширює хінтерленд морського порту, підсилюючи його здатність приймати, перерозподіляти та спрямовувати вантажопотоки у напрямку світових форлендів.

2. Принцип технологічної інтеграції в системі хінтерленд-порт-форленд (hinterland-seaport-foreland). Частина портових виробничих і сервісних операцій (port operational and service functions) переноситься на внутрішній термінал (inland terminal), унаслідок чого формується єдиний, узгоджений технологічний процес (integrated technological process), що охоплює весь маршрут від хінтерленду (hinterland) через морський порт (seaport) до форленду (foreland). Dry port стає внутрішнім технологічним «модулем» морського порту.

3. Принцип функціональної повноти в обслуговуванні хінтерлендних вантажопотоків (hinterland freight flows). Dry port об'єднує виробничі, митні, сервісні та додаткові функції, необхідні для ефективного обслуговування хінтерлендних вантажів (hinterland cargo) та оптимізації взаємодії з морським портом (seaport).

4. Принцип регіонального каталізу та розвитку хінтерленду (hinterland development). Сухий порт підсилює економічний вплив морського порту шляхом розширення його хінтерленду (expansion of the port's hinterland), стимулюючи розвиток внутрішніх територій, індустриальних зон та транспортних кластерів (transport clusters).

5. Принцип заміщення та комплементарності в системі хінтерленд-порт-форленд (hinterland-seaport-foreland). Dry port може частково замішувати окремі операції морського порту (extended gate) або виконувати комплементарні функції (complementary functions), гармонізуючи взаємодію між потребами хінтерленду (hinterland) та вимогами світових форлендних ринків (foreland markets). У такому разі dry port виконує роль мостового інфраструктурного компонента, який гармонізує взаємодію між внутрішніми територіями та глобальними торговельними маршрутами.

Запропонована Integrated Dry Port Conceptual Model (2025) доцільно доповнюється положеннями дуального підходу до розмежування поглядів на порт і портовий термінал з позицій транспортної науки та логістики, сформульованого у роботі Кириллової О.В., Ларіної І.М. (2025) [41]. Зазначений підхід виходить із того, що роль і статус портових об'єктів істотно залежать від наукової парадигми, у межах якої вони аналізуються, а також від організаційної та функціональної інтеграції цих об'єктів у відповідні системи.

З позицій транспортної науки порт і портовий термінал розглядаються як інфраструктурні елементи транспортної системи, що виконують функції перевантаження, зберігання вантажів, обслуговування суден і технічних засобів суміжних видів транспорту, а також інші види господарської діяльності, пов'язані з реалізацією транспортного процесу. У цьому контексті управління вантажами та вантажопотоками здійснюється портовим оператором у межах його компетенції та не

є тотожним наскрізному управлінню матеріальним потоком.

Натомість логістичний підхід базується на концепції наскрізного управління матеріальним потоком єдиним суб'єктом на всіх етапах його руху. Однак у більшості практичних випадків, коли вантаж потрапляє на територію порту або портового терміналу, відповідальність за його подальше переміщення переходить до портового оператора, що унеможливорює реалізацію повноцінного наскрізного управління з боку виробничого або торговельного підприємства. Реалізація логістичного підходу можлива лише за умови, що портовий або термінальний об'єкт є інтегрованим у виробничу структуру підприємства та входить до складу його логістичної системи.

Зазначені положення мають принципове значення для інтерпретації сухого порту у межах запропонованої концептуальної моделі. У Integrated Dry Port Conceptual Model (2025) dry port розглядається насамперед як інтермодальний внутрішній вузол транспортної системи, технологічно інтегрований із морським портом та включений у просторово-функціональну систему «хінтерленд-морський порт-форленд». Така інтерпретація відповідає транспортно-науковому підходу та дозволяє уникнути необґрунтованого отождивлення dry port із логістичним центром або елементом логістичної системи виробника у випадках, коли відсутня його організаційна інтеграція у відповідний виробничий процес.

Водночас дуальний підхід створює методологічні передумови для гнучкої інтерпретації dry port: за умови його інституційної та організаційної інтеграції у структуру підприємства сухий порт може виконувати функції елемента логістичної системи, забезпечуючи розширене управління матеріальними потоками. Таким чином, dry port у межах концептуальної моделі постає як гібридний об'єкт, статус і роль якого визначаються не лише набором виконуваних функцій, а й його місцем у транспортній або логістичній системі.

Висновки

Тож до основних проблем, встановлених в процесі вивчення останніх досліджень та публікацій можна віднести:

- широкий спектр термінологічних підходів до визначення концепту «сухий порт»;
- невизначеність у функціональному наповненні об'єктів даного типу;
- практика розгляду «сухих портів» переважно окремо від поняття «морський порт»;
- фіксований рівень розвитку контейнерного терміналу морського порту при дослідженні його взаємодії з dry port, часто без урахування регіональної специфіки;
- істотні розбіжності між вітчизняними та закордонними науковими підходами до термінології й функцій dry port.

Відповідно до одного з критеріїв [3], сухий порт як інтермодальний внутрішній термінал має забезпечувати внутрішнє продовження морського порту, виступаючи його інтерфейсом усередині країни та надаючи послуги, що традиційно доступні в морському порту. У цьому контексті розвиток інтермодального транспорту є критично важливим для формування та функціонування внутрішніх терміналів.

Очевидно, що без покращення внутрішнього доступу до морських портів за допомогою інтермодального транспорту та відповідної термінальної інфраструктури неможливо забезпечити ефективність усього транспортного ланцюга.

Спираючись на світовий досвід, доцільно розглядати внутрішній «сухий порт» як інтермодальний термінал, безпосередньо (технологічно) пов'язаний із терміналами морського порту, у межах якого реалізується частина його виробничих, митних та сервісних функцій.

Математична інтерпретація функцій dry port і морського порту через зони перетину та неперетину множин (N, M, L) дозволяє формалізувати розподіл митних, виробничих, сервісних і додаткових операцій між ними та відобразити ситуації як

комплементарності, так і часткового заміщення функцій морського порту.

Таким чином, функції області перетину DT та SP (N) та областей DT та SP що не перетинаються (M та L відповідно) розподілено наступним чином:

$$v(p); v(s); s; d; tz \in N; \quad (1)$$

де $v(p); v(s)$ – перевалка за прямим та за складським варіантами робіт відповідно;

s – функції складування;

d – додаткові послуги;

tz – функції з обробки транспортних засобів.

$$v(s); m; s; d; tz \in M; \quad (2)$$

де m – митні операції.

$$v(p); d; tz \in L. \quad (3)$$

На рисунку 2 наведено логіко-структурну візуалізацію концептуальної моделі інтегрованого сухого порту з визначенням зони його перетину з морським портом, у межах якої «сухий порт», як його підмножина, може реалізовувати різний комплекс виробничих операцій, зокрема забезпечувати виконання перевалки вантажів не лише за складським, але й за прямим варіантами робіт.

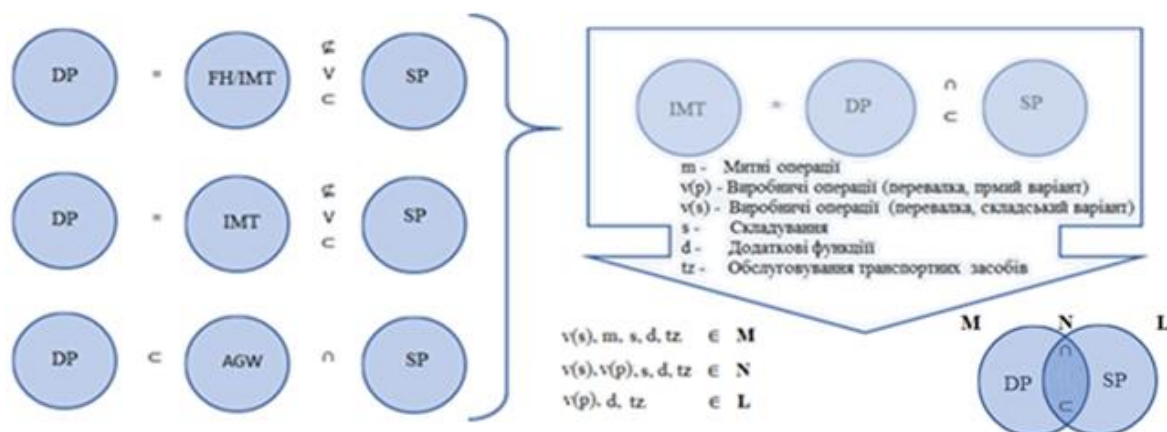


Рис. 2 – Логіко-структурна візуалізація концептуальної моделі інтегрованого сухого порту (Integrated Dry Port Conceptual Model, 2025)

Очевидно, що застосування такого підходу до концепції «сухий порт» надає йому каталітичних функцій з регіонального розвитку вітчизняних портів, закріплює їх присутність на макрорівні, підвищуючи рівень галузевої конкурентної. Реалізація даного підходу до визначеної концепції можлива через інвестиційні механізми, в тому числі через механізми державно-приватного партнерства з залученістю портової адміністрації, глобальних портових та/або лінійних операторів тощо. Наразі для подальшої оптимізації управління підприємствами морського транспорту стає потреба в опрацюванні не тільки термінологічних відмінностей, але й у вивченні особливостей кореляції «сухого порту» з об'єктом «морський порт» та корегуванні відповідного функціонального навантаження.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

1. Вперше в українській науці систематизовано термінологічне поле dry port із застосуванням формалізованого апарату логічних відношень ($=$, $\subset$, $\supset$, $\subseteq$, $\cap$, $\cup$, $\setminus$), що дозволило описати внутрішню таксономію виробничих транспортних об'єктів (мультимодальний термінал, внутрішній термінал, розширений шлюз тощо) та встановити характер їх кореляції з поняттям «сухий порт».

2. Запропоновано авторську концептуальну модель інтегрованого сухого порту: Integrated Dry Port Conceptual Model (2025), у межах якої dry port обґрунтовано як інтермодальний внутрішній термінал, технологічно інтегрований із морським портом та включений у просторово-функціональну систему

«хітерленд-морський порт-форленд». Модель описує сутнісні характеристики dry port через:

- систему концептуальних елементів (просторові межі, функції, інтеграційні зв'язки);
- сукупність базових принципів (інтермодальність, технологічна інтеграція, функціональна повнота, регіональний каталіз, заміщення та комплементарність);
- міжелементні зв'язки у системі DP-SP та у триаді hinterland-seaport-foreland.

3. На основі аналізу світових практик формалізовано кореляцію між dry port (DP) та морським портом (SP), що дозволило визначити умови, за яких dry port може:

- функціонувати як розширений шлюз (extended gate) морського порту, частково заміщуючи його виробничі та сервісні операції;
- виконувати комплементарні функції, підвищуючи стійкість і ефективність глобального ланцюга транспортування вантажів.

4. Уперше концептуальну модель інтегрованого сухого порту доповнено положеннями дуального підходу до розмежування поглядів на порт і портовий термінал з позицій транспортної науки та логістики. У межах запропонованої концептуальної моделі обґрунтовано, що:

- з позицій транспортної науки dry port є елементом транспортної системи, інтермодальним вузлом, у межах якого управління вантажами та вантажопотоками здійснюється портовим оператором і не є тотожним наскрізному управлінню матеріальними потоками;

- з позицій логістичного підходу dry port може розглядатися як елемент логістичної системи підприємства лише за умови його організаційної та інституційної інтеграції у виробничу структуру відповідного суб'єкта господарювання.

5. Запропоновано концептуальне трактування сухого порту як гібридного об'єкта, статус і функціональна роль якого визначаються не лише набором виконуваних операцій, але й:

- місцем у транспортній або логістичній системі;
- характером організаційної належності;
- рівнем інтеграції у виробничі та управлінські процеси.

Таке трактування дозволяє усунути термінологічні суперечності між транспортним і логістичним підходами та створює методологічні передумови для обґрунтованого вибору моделей управління сухими портами в умовах глобалізації транспортних систем.

Перелік використаних джерел

- [1] Notteboom T., Rodrigue J-P. Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development. *Maritime Policy and Management*. 2005. Vol. 32(3). Pp. 297-313. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088830500139885>.
- [2] Notteboom T., Rodrigue J-P. Foreland-Based Regionalization: Integrating Intermediate Hubs with Port Hinterlands. *Research in Transportation Economics*. 2020. № 27. Pp. 19-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.12.004>.
- [3] Notteboom T., Pallis A., Rodrigue J-P. *Port Economics, Management and Policy*. London : Routledge, 2022. 690 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429318184>.
- [4] Кириллова О., Кириллова В. Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів. *Транспортні системи та технології*. 2022. № 40. С. 170-89. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-15>.
- [5] Кириллова О. В., Ромаха В. Л. Трансформація ринку глобальних операторів контейнерних терміналів у контексті інтернаціоналізації, регіоналізації та цифрової адаптації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 1, № 2(93). С. 88-101. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.12>.
- [6] Roso V., Lumsden K. The Dry Port Concept: Moving Seaport Activities Inland. *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific*. 2009. № 78. Pp. 87-101.
- [7] Notteboom T., Rodrigue J.-P. Inland Terminals within North American and European Supply Chains. *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific*. 2009. № 78. Pp. 1-39.
- [8] Monios J., Wilmsmeier G. Port-Centric Logistics, Dry Ports and Offshore Logistics Hubs: Strategies to Overcome Double Peripherality? *Maritime Policy & Management*. 2012. № 39(2). Pp. 207-226. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2011.650720>.
- [9] A Study of Dry Port Development in China / Beresford A., Pettit S., Qing X., Williams S. *Maritime Economics & Logistics*. 2012. № 14(1). Pp. 73-98. DOI: <https://doi.org/10.1057/MEL.2011.17>.
- [10] Roso V., Lumsden K. A review of dry ports. *Maritime Economics & Logistics*. 2010. № 12. Pp. 196-213. DOI: <https://doi.org/10.1057/mel.2010.5>.
- [11] Khaslavskaya A., Roso V. Dry ports: research outcomes, trends, and future implications. *Maritime Economics & Logistics*. 2020. № 22. Pp. 265-292. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00152-9>.
- [12] Nguyen L. C., Notteboom T. The relations between dry port characteristics and regional port-hinterland settings: findings for a global sample of dry ports. *Maritime Policy & Management*. 2018. № 46(1). Pp. 24-42. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1448478>.
- [13] UNESCAP. Cross-Cutting Issue for Managing Globalization Related to Trade and Transport: Promoting Dry Ports as a Means of Sharing the Benefits of Globalization with Inland Locations: Note. Bangkok: UNESCAP, 2006. 12 p.
- [14] Beresford A. K., Dubey R. C. *Handbook on the Management and Operation of Dry Ports*. Geneva : United

- nations conference on trade and development, 1990. 103 p.
- [15] Roso V. Factors influencing implementation of a dry port. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*. 2008. Vol. 38, iss. 10. Pp. 782-798. DOI: <https://doi.org/10.1108/09600030810926493>.
- [16] United Nations. Dry ports, intermodal terminals and logistics development. *Review of Developments in Transport in Asia and the Pacific*. 2013. Pp. 67-80. DOI: <https://doi.org/10.18356/440d0785-en>.
- [17] Петренко О. І., Пашкович А. М. Особливості функціонування сухих портів в Україні. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2021. № 3(486). С. 58-64. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2021.3\(486\).8](https://doi.org/10.15589/znp2021.3(486).8).
- [18] Горачек О., Горова К. «Сухий порт». Особливості та організація роботи. АПК-інформ. Підсумки. 2021. № 7(85). URL: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1521245> (дата звернення: 23.08.2025).
- [19] Руда Т., Барабаш О. Нормативно-правове регулювання діяльності «Сухих портів». *Development Service Industry Management*. 2023. № 3. С. 213-217. DOI: [https://doi.org/10.31891/dsim-2023-3\(32\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2023-3(32)).
- [20] Munford C. Buenos Aires – congestion and the dry port solution. *Cargo Systems International: The Journal of ICHCA*. 1980. Vol. 7, iss. 10. Pp. 26-31.
- [21] Hanappe P. Plates-formes logistique, centres de logistique, ports secs. *Recherche, transports, sécurité*. 1986. Vol. 12. Pp. 21-26.
- [22] United Nations Convention on the Law of the Sea of 10.12.1982. URL: <https://www.un.org/depts/los/conventionagreements/texts/unclos/unclosr.pdf> (дата звернення: 01.09.2025).
- [23] United Nations Conference on Trade and Development – UNCTAD. Handbook on the Management and Operation of Dry Ports. Geneva, Switzerland, 1991. 93 p.
- [24] Воронков В. Чому сухі порти не стають локомотивами морської галузі? *Голос України*. 2021. URL: <http://www.golos.com.ua/article/341199> (дата звернення: 01.09.2025).
- [25] Загородня Ю. В. Перспективи стратегічного розвитку морських портів України. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва. Серія «Економічні науки»*. 2020. № 4, т. 1. С. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.31359/2312-3427-2020-4-1-49>.
- [26] Неліпович О. В. Сутність та функціональне навантаження «Сухих портів» в сучасних умовах. *Сталій розвиток економіки*. 2023. № 1(46). С. 98-105. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-46-13>.
- [27] Тимошук О. М., Мельник О. В., Мірошник О. В. Застосування митної логістики на водному транспорті. *Інвестиції: практика та досвід*. 2017. № 2. С. 27-30.
- [28] Бутько Т. В., Ломотько Д. В., Панкратов В. І. Формування логістичної технології «сухий порт» в умовах підприємств промислового залізничного транспорту. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2008. Т. 5, № 3(35). С. 26-29.
- [29] Бауліна Г. С. Формування моделі логістичної технології «Прикордонний порт» в умовах прикордонної перевантажувальної станції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. Т. 3, № 6(45). С. 60-63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2852>.
- [30] Slack B. Satellite terminals: a local solution to hub congestion? *Journal of Transport Geography*. 1999. Vol. 7. Pp. 241-246. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(99)00016-2).
- [31] Hölting D. Terminals, intermodal logistics centres and European infrastructure policy : diss. ... Dr. rer. pol. Berlin, 1995. 252 p.
- [32] Tsamboulas D., Dimitropoulos I. Appraisal of investments in European nodal centres for goods – freight villages: A comparative analysis. *Transportation*. 1999. Vol. 26 (4). Pp. 381-398. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005134525773>.
- [33] Tsilingiris P., Laguardia C. Dry vis-à-vis water ports: partners or competitors? The case of Spain. *Competitiveness and Complementarity of Transport Modes - Perspectives for the Development of Intermodal Transport* : proceedings of the 1st International Scientific Conference, Chios, Greece, 10-12 May 2007. Pp. 39-55.
- [34] Ng K., Gujar G. The spatial characteristics of inland transport hubs: evidences from Southern India. *Journal of Transport Geography*. 2008. Vol. 17(5). Pp. 346-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.07.010>.
- [35] Veenstra A., Zuidwijk R., Asperen E. The extended gate concept for container terminals: Expanding the notion of dry ports. *Maritime Economics and Logistics*. 2012. № 14. Pp. 14-32. DOI: <https://doi.org/10.1057/mel.2011.15>.
- [36] Wilmsmeier G., Monios J., Lambert B. The directional development of intermodal freight corridors in relation to inland terminals. *Journal of Transport Geography*. 2011. № 19. Pp. 1379-1386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.07.010>.
- [37] Попель С. Особливості створення «Сухих портів» у Сполучених Штатах Америки. *Сталій розвиток економіки*. 2023. Вип. 1(46). С. 110-116. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-46-15>.
- [38] Rodrigue J.-P., Notteboom T. Dry ports in European and North American intermodal rail systems: Two of a kind? *Research in Transportation Business and Management*. 2012. № 5. Pp. 4-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.10.003>.
- [39] Ng A., Tongzon J. The transportation sector of India's economy: Dry ports as catalysts for regional

- development. *Eurasian Geography and Economics*. 2010. № 51. Pp. 669-682. DOI: <https://doi.org/10.2747/1539-7216.51.5.669>.
- [40] Dorostkar E., Shahbazi S., Naeini S. The effect of forming dry port in spatial and regional planning system in Yazd Province. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. № 11. Pp. 145-152. DOI: <https://doi.org/10.3923/jeasci.2016.145.152>.
- [41] Кириллова О. В., Ларіна І. М. Дуальний підхід до розмежування поглядів на сучасний порт і портовий термінал з позицій транспортної науки і логістики. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 2. С. 234-242. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/35>.
- [42] Haralambides H., Gujar G. The Indian dry ports sector, pricing policies and opportunities for public-private partnerships. *Research in Transportation Economics*. 2011. № 33. Pp. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2011.08.006>.
- [43] Modeling dry-port-based freight distribution planning / Crainic T., Dell'Olmo P., Ricciardi N., Sgalambro A. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 55. Pp. 518-534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.026>.
- [44] Ромах В. Л., Тихонін В. І., Тихоніна І. І. Методика визначення маршруту переміщення вантажопотоків в системі «сухий порт – морський порт». *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 4(87). С. 137-147. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.16>.
- [45] Alam J. Role of effective planning process in boosting dry port effectiveness: A case study of central Pakistan. *International Journal of Supply Chain Management*. 2016. № 5. Pp. 153-164. DOI: <https://doi.org/10.59160/ijscm.v5i3.1218>.
- [46] Research Trends in Dry Port Sustainability. A Bibliometric Analysis / Beyene Z., Nadeem S., Jaleta M., Kreie A. *Sustainability*. 2024. № 16 (1). Article 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16010263>.

CONCEPTUAL MODEL OF AN INTEGRATED DRY PORT: A SYSTEMIC VISION IN THE TRIAD «HINTERLAND-SEAPORT-FORELAND»

Kyrylova O.V.

D.Sc. (Engineering), professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3414-7364>, e-mail: kirillova18@i.ua;

Romakh V.L.

PhD candidate, senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-0041>, e-mail: romakhvalentina@gmail.com

The article is devoted to the systematization of terminological, functional and conceptual approaches to the definition of the concept of «dry port» in relation to a seaport and other production transport facilities. It is shown that the intensity and depth of national research on this topic significantly lag behind the world scientific discourse, and the terminological field of dry port is characterized by a high degree of fragmentation. Based on the content analysis of international and national sources, more than 40 variants of terminological interpretations that describe a dry port through a set of related objects, have been identified: multimodal terminal, rear cargo terminal, logistics hub, multifunctional logistics center, inland terminal, inland customs warehouse, intermodal terminal, expanded gateway, etc. The application of a formalized apparatus of logical relations ($=$, $\subset$, $\supset$, $\not\subset$, $\vee$, $\wedge$, $\cap$) allowed us to describe how a dry port can be considered an equivalent, subset, superset, functional substitute, or opposed to a seaport in various studies. The differences between native and foreign approaches are shown: Ukrainian researchers mainly tend to interpret a dry port as a «multimodal» node with a dominance of customs functionality, while international discourse focuses on an «intermodal» dry port as a key component of global trade connectivity that integrates forelands and internal (regional) connections. Based on structural and functional analysis, logical modeling of terminological relationships and comparative analysis of world cases (EU, China, India, USA), the author's conceptual model of an integrated dry port (Integrated Dry Port Conceptual Model, 2025) was developed. Within the framework of this model, a dry port is interpreted as an intermodal domestic terminal, technologically integrated with a seaport and included in the spatial-functional system «hinterland-seaport-foreland», in which it performs a complex of production, customs, service and additional functions and acts as a catalyst for the regional development of port hinterlands. The proposed conceptual model forms a holistic theoretical framework for further adaptation and implementation of a dry port as a tool for increasing the competitiveness of national seaports in the global trade environment.

Keywords: dry port, seaport, hinterland, foreland, intermodal terminal, regionalization, concept.

References

- [1] T. Notteboom, and J-P. Rodrigue, "Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development,"

Maritime Policy and Management, vol. 32(3), pp. 297-313, 2005. doi: [10.1080/03088830500139885](https://doi.org/10.1080/03088830500139885).

- [2] T. Notteboom, and J.-P. Rodrigue, "Foreland-Based Regionalization: Integrating Intermediate Hubs with Port Hinterlands," *Research in Transportation Economics*, № 27, pp. 19-29, 2020. doi: **10.1016/j.re-trec.2009.12.004**.
- [3] T. Notteboom, A. Pallis, and J.-P. Rodrigue, *Port Economics, Management and Policy*. London, UK: Routledge, 2022. doi: **10.4324/9780429318184**.
- [4] O. Kyrylova, and V. Kyrylova, "Teoretychni osnovy prostorovoi ta funktsionalnoi evoliutsii portiv" ["Theoretical foundations of spatial and functional evolution of ports"], *Transportni systemy ta tekhnologii*, № 40, pp. 170-89, 2022. doi: **10.32703/2617-9040-2022-40-15**. (Ukr.)
- [5] O.V. Kyrylova, and V.L. Romakh, "Transformatsiia rynku hlobalnykh operatoriv konteinerlykh terminaliv u konteksti internatsionalizatsii, rehionalizatsii ta tsyfrovoy adaptatsii" ["Transformation of the global container terminal operators market in the context of internationalization, regionalization and digital adaptation"], *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Kherson National Technical University*, vol. 1, № 2(93), pp. 88-101, 2025. doi: **10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.12**. (Ukr.)
- [6] V. Roso, and K. Lumsden, "The Dry Port Concept: Moving Seaport Activities Inland," *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific*, № 78, pp. 87-101, 2009.
- [7] T. Notteboom, and J.-P. Rodrigue, "Inland Terminals within North American and European Supply Chains," *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific*, № 78, pp. 1-39, 2009.
- [8] J. Monios, and G. Wilmsmeier, "Port-Centric Logistics, Dry Ports and Offshore Logistics Hubs: Strategies to Overcome Double Peripherality?," *Maritime Policy & Management*, № 39(2), pp. 207-226, 2012. doi: **10.1080/03088839.2011.650720**.
- [9] A. Beresford, S. Pettit, X. Qing, and S. Williams, "A Study of Dry Port Development in China," *Maritime Economics & Logistics*, № 14(1), pp. 73-98, 2012. doi: **10.1057/MEL.2011.17**.
- [10] V. Roso, and K. Lumsden, "A review of dry ports," *Maritime Economics & Logistics*, № 12, pp. 196-213, 2010. doi: **10.1057/mel.2010.5**.
- [11] A. Khaslavskaya, and V. Roso, "Dry ports: research outcomes, trends, and future implications," *Maritime Economics & Logistics*, № 22, pp. 265-292, 2020. doi: **10.1057/s41278-020-00152-9**.
- [12] L.C. Nguyen, and T. Notteboom, "The relations between dry port characteristics and regional port-hinterland settings: findings for a global sample of dry ports," *Maritime Policy & Management*, № 46(1), pp. 24-42, 2018. doi: **10.1080/03088839.2018.1448478**.
- [13] UNESCAP. *Cross-Cutting Issue for Managing Globalization Related to Trade and Transport: Promoting Dry Ports as a Means of Sharing the Benefits of Globalization with Inland Locations: Note*. Bangkok, Thailand: UNESCAP, 2006.
- [14] A.K. Beresford, and R.C. Dubey, *Handbook on the Management and Operation of Dry Ports*. Geneva, Switzerland: United nations conference on trade and development, 1990.
- [15] V. Roso, "Factors influencing implementation of a dry port," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 38, iss. 10, pp. 782-798, 2008. doi: **10.1108/09600030810926493**.
- [16] United Nations, "Dry ports, intermodal terminals and logistics development," in *Review of Developments in Transport in Asia and the Pacific*. 2013, pp. 67-80. doi: **10.18356/440d0785-en**.
- [17] O.I. Petrenko, and A.M. Pashkovich, "Osoblyvosti funktsionuvannya sukhykh portiv v Ukraini" ["Features of dry ports functioning in Ukraine"], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannya imeni admiral Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, № 3(486), pp. 58-64, 2021. doi: **10.15589/znp2021.3(486).8**. (Ukr.)
- [18] O. Horachek, and K. Horova, "«Sukhyi port». Osoblyvosti ta orhanizatsiia roboty" ["«Dry Port». Features and organization of work"], *APK-inform. Pidsumky – APK-inform. Results*, № 7(85), 2021. [Online]. Available: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1521245>. Accessed on: Aug. 23, 2025. (Ukr.)
- [19] T. Ruda Tatyana, and O. Barabash, "Normatyvno-pravove rehuliuвання діяльності «Sukhykh portiv»" ["Regulatory and legal regulation of the activities of «Dry ports»"], *Development Service Industry Management*, № 3, pp. 213-217, 2023. doi: **10.31891/dsim-2023-3(32)**. (Ukr.)
- [20] C. Munford, "Buenos Aires – congestion and the dry port solution," *Cargo Systems International: The Journal of ICHCA*, vol. 7, iss. 10, pp. 26-31, 1980.
- [21] P. Hanappe, "Plates-formes logistique, centres de logistique, ports secs," *Recherche, transports, sécurité*, vol. 12, pp. 21-26, 1986.
- [22] United Nations Convention on the Law of the Sea of 10.12.1982. [Online]. Available: <https://www.un.org/depts/los/conventionagreements/texts/unclos/unclosr.pdf>. Accessed on: Sept. 01, 2025.
- [23] United Nations Conference on Trade and Development – UNCTAD, *Handbook on the Management and Operation of Dry Ports*. Geneva, Switzerland, 1991.
- [24] V. Voronkov, "Chomu sukhi porty ne staiut lokomotyvamy morskoi haluzi?" ["Why don't dry ports become the locomotives of the maritime industry?"], *Holos Ukrainy – Voice of Ukraine*, 2021. [Online]. Available: <http://www.golos.com.ua/article/341199>. Accessed on: Sept. 01, 2025. (Ukr.)
- [25] Y.V. Zagorodnia, "Perspektyvy stratehichnoho rozvytku morskyykh portiv Ukrainy" ["Prospects for

- the strategic development of seaports in Ukraine”], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu im. V.V. Dokuchaieva. Seriya «Ekonomichni nauky» – Bulletin of the Kharkiv National Agrarian University named after V.V. Dokuchaev. Series «Economic Sciences»*, № 4, vol. 1, pp. 49-58, 2020. doi: **10.31359/2312-3427-2020-4-1-49**. (Ukr.)
- [26] O. Nelipovych, “Sutnist ta funktsionalne navantazhennia «Sukhykh portiv» v suchasnykh umovakh” [“Essence and functional load of «Dry ports» in modern conditions”], *Stalyi rozvytok ekonomiky – Sustainable development of economy*, № 1(46), pp. 98-105, 2023. doi: **10.32782/2308-1988/2023-46-13**. (Ukr.)
- [27] O. Timoshuk, O. Melnik, and A. Miroshnik, “Zastosuvannia mytnoi lohistyky na vodnomu transporti” [“Application of customs logistics water transport”], *Investysii: praktyka ta dosvid*, № 2, pp. 27-30, 2017. (Ukr.)
- [28] T.V. Butko, D.V. Lomotko, and V.I. Pankratov, “Formuvannia lohistychnoi tekhnolohii «sukhyi port» v umovakh pidpriemstv promyslovoho zaliznychnoho transportu” [“Formation of the logistics technology «dry port» in the conditions of industrial railway transport enterprises”], *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, № 3(35), pp. 26-29, 2008 (Ukr.)
- [29] H.S. Baulina, “Formuvannia modeli lohistychnoi tekhnolohii «Prykordonnyi port» v umovakh prykordonnoi perevantazhuvalnoi stantsii” [“Formation of model of logistical technology «frontier dry port» in the conditions of frontier reloading stations”], *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, № 6(45), pp. 60-63, 2010. doi: **10.15587/1729-4061.2010.2852**. (Ukr.)
- [30] B. Slack, “Satellite terminals: a local solution to hub congestion?”, *Journal of Transport Geography*, vol. 7, pp. 241-246, 1999. doi: **10.1016/S0966-6923(99)00016-2**.
- [31] D. Hölten, “Terminals, intermodal logistics centres and European infrastructure policy”, PhD Dissertation, Berlin, 1995.
- [32] D. Tsamboulas, and I. Dimitropoulos, “Appraisal of investments in European nodal centres for goods – freight villages: A comparative analysis,” *Transportation*, vol. 26(4), pp. 381-398, 1999. doi: **10.1023/A:1005134525773**.
- [33] P. Tsilingiris, and C. Laguardia, “Dry vis-à-vis water ports: partners or competitors? The case of Spain,” in *Proc. of the 1st Int. Sci. Conf. «Competitiveness and Complementarity of Transport Modes - Perspectives for the Development of Intermodal Transport»*, Chios, Greece, May 10-12, 2007, pp. 39-55.
- [34] K. Ng, and G. Gujar, “The spatial characteristics of inland transport hubs: evidences from Southern India,” *Journal of Transport Geography*, vol. 17(5), pp. 346-356, 2008. doi: **10.1016/j.jtrangeo.2008.07.010**.
- [35] A. Veenstra, R. Zuidwijk, and E. Asperen, “The extended gate concept for container terminals: Expanding the notion of dry ports,” *Maritime Economics and Logistics*, № 14, pp. 14-32, 2012. doi: **10.1057/mel.2011.15**.
- [36] G. Wilmsmeier, J. Monios, and B. Lambert, “The directional development of intermodal freight corridors in relation to inland terminals,” *Journal of Transport Geography*, № 19, pp. 1379-1386, 2011. doi: **10.1016/j.jtrangeo.2011.07.010**.
- [37] S. Popel, “Ocoblyvosti stvorennia «Sukhykh portiv» u Spoluchenykh Shtatakh Ameryky” [“Features of the creation of “Dry ports” in the United States of America”], *Stalyi rozvytok ekonomiky – Sustainable development of economy*, vol. 1(46), pp. 110-116, 2023. doi: **10.32782/2308-1988/2023-46-15**.
- [38] J.-P. Rodrigue, and T. Notteboom, “Dry ports in European and North American intermodal rail systems: Two of a kind?”, *Research in Transportation Business and Management*, № 5, pp. 4-15, 2012. doi: **10.1016/j.rtbm.2012.10.003**.
- [39] A. Ng, and J. Tongzon, “The transportation sector of India’s economy: Dry ports as catalysts for regional development,” *Eurasian Geography and Economics*, № 51, pp. 669-682, 2010. doi: **10.2747/1539-7216.51.5.669**.
- [40] E. Dorostkar, S. Shahbazi, and S. Naeini, “The effect of forming dry port in spatial and regional planning system in Yazd Province,” *Journal of Engineering and Applied Sciences*, № 11, pp. 145-152, 2016. doi: **10.3923/jeasci.2016.145.152**.
- [41] O.V. Kyrylova, and I.M. Larina, “Dualnyi pidkhid do rozmezhuvannia pohliadiv na suchasnyi port i portovy terminal z pozytsii transportnoi nauky i lohistyky” [“Dual approach to the distinction of views on the modern port and port terminal from the standpoint of transport science and logistics”], *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 36(75), № 2, pp. 234-242, 2025. doi: **10.32782/2663-5941/2025.2.1/35**. (Ukr.)
- [42] H. Haralambides, and G. Gujar, “The Indian dry ports sector, pricing policies and opportunities for public-private partnerships,” *Research in Transportation Economics*, № 33, pp. 51-58, 2011. doi: **10.1016/j.retrec.2011.08.006**.
- [43] T. Crainic, P. Dell’Olmo, N. Ricciardi, and A. Sgalambro, “Modeling dry-port-based freight distribution planning,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Engineering and Applied Sciences*, vol. 55, pp. 518-534, 2015. doi: **10.1016/j.trc.2015.03.026**.
- [44] V.L. Romakh, V.I. Tykhonin, and I.I. Tykhonina, “Metodyka vyznachennia marshrutu peremishchennia

vantazhopotokiv v systemi «sukhyi port – morskyy port»” [“Method of determining the route of cargo flows in the «dry port-sea port» system”], *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Kherson National Technical University*, № 4(87), pp. 137-147, 2023. doi: **10.35546/kntu2078-4481.2023.4.16**. (Ukr.)

- [45] J. Alam, “Role of effective planning process in boosting dry port effectiveness: A case study of central Pakistan,” *International Journal of Supply Chain*

Management, № 5, pp. 153-164, 2016. doi: **10.59160/ijscm.v5i3.1218**.

- [46] Z. Beyene, S. Nadeem, M. Jaleta, and A. Kreie, “Research Trends in Dry Port Sustainability. A Bibliometric Analysis,” *Sustainability*, № 16 (1), article 263, 2024. doi: **10.3390/su16010263**.

Стаття надійшла 16.11.2025

Стаття прийнята 08.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Кириллова О. В., Ромах В. Л. Концептуальна модель інтегрованого сухого порту: системне бачення у триаді «hinterland-seaport-foreland». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 229-243. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351135>.

MULTIMODAL TRANSPORTATION RISK MODELING IN UKRAINE

Zhyshchynskyi Y.S.postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4020-4576>, e-mail: jekas1367@gmail.com;**Sharko O.**D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-7990>, e-mail: mvsharko@gmail.com

The article examines the organization and development prospects of multimodal transportation in Ukraine amid growing international trade, deeper integration into global supply chains, and the challenges posed by the ongoing war. The study emphasizes that multimodal transport – combining road, rail, sea, and air modes – plays a crucial role in ensuring flexible and efficient cargo delivery while reducing overall logistics costs. Despite its significant potential, multimodal transportation in Ukraine faces substantial constraints, including underdeveloped infrastructure, a shortage of integrated intermodal terminals, incompatibility between transport systems, and an imperfect regulatory and legal framework. Additional difficulties arise from complex border procedures, insufficient digitalization of logistics processes, and the limited use of unified IT systems for real-time cargo monitoring. The paper provides an overview of leading logistics companies – such as DB Schenker, Maersk, DSV, DHL, Nova Global, Kuehne+Nagel, and Meest Express – that currently operate in Ukraine using multimodal solutions. Particular attention is given to the impact of the war on logistics flows, including the closure of Ukrainian airspace, the blockade of seaports, and the reorientation of transportation routes through Poland, Slovakia, Hungary, Romania, and Moldova. The study presents examples of multimodal routes and highlights the importance of adapting logistics strategies to emerging risks, such as infrastructure damage and security threats. A mathematical model is proposed to optimize transportation processes under uncertainty, accounting for unpredictable events such as route blockages, adverse weather conditions, and military risks. The model is formulated as a stochastic optimization problem that minimizes expected costs or delivery time while incorporating the probabilities of risk occurrence. Simulation results demonstrate how delivery times vary depending on distance and the influence of additional risk factors. The findings confirm that multimodal transport remains a strategic tool for ensuring Ukraine's effective participation in global trade flows. Overcoming infrastructural and regulatory barriers, strengthening international cooperation, and implementing advanced digital solutions will significantly enhance the efficiency and resilience of multimodal transportation, contributing to sustainable economic recovery and the country's integration into the global logistics network.

Keywords: multimodal transportation, logistics optimization, international trade, infrastructure and tourism problems, risk management.

Statement of the problem

The advancement of multimodal transportation stands out as a pivotal strategy for developing Ukraine's transport system. This approach facilitates a substantial rise in cargo volumes nationwide by involving domestic transport companies. It not only bolsters Ukraine's competitiveness within the international transport services market but also extends the reach of existing transport corridors while aligning the country's infrastructure more closely with the global transport network. When goods pass state borders, intermodal transportation comes into play. Thanks to its strategically advantageous location, strong ties with Central and Eastern European nations, well-established transport corridors, and developed infrastructure, Ukraine emerges as a key transit hub, effectively bridging Asia with the European Union [1].

The significance of this topic stems from the expansion of international trade and the ongoing necessity to optimize logistics chains, with multimodal transportation serving as a critical component. In today's context, advancing multimodal systems can foster economic growth and draw investments. Improving transport efficiency is vital for minimizing costs and shortening delivery times. The growing complexity of global supply chains and transport networks highlights the importance of effectively

managing multimodal transportation, especially under uncertain conditions. Contemporary research focuses extensively on route optimization, risk management, enhancing the resilience of transport networks, and integrating advanced digital technologies.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Transportation today is carried out in multiple combinations on a door-to-door basis, under the conditions defined by international agreements developed by the Working Group on Intermodal Transport and Logistics, jointly formed by ECMT and UNECE [2].

Multimodal transportation in Ukraine has not yet achieved the expected level of development due to several reasons, primarily the imperfection of the regulatory framework, the lack of clear strategic principles for development, and imbalances between port cargo-handling capacities and the railway infrastructure connected to them. These factors slow down container transport growth and limit piggyback (road–rail) transportation.

Multimodal operators also face high risks when organizing combined long-distance transportation. A key challenge is the requirement for the freight forwarder (operator) to assume responsibility for the actions of third

parties in international transport and to manage high levels of uncertainty, maintaining coordination and synergy within networks of logistics centers along international transport corridors [3].

Route optimization and uncertainty modeling occupy a significant part of scientific research. Several studies aim to minimize costs and delivery time while accounting for stochastic factors. The authors of [4] combined a genetic algorithm with particle swarm optimization to determine optimal routes for emergency cargo delivery. While the method provides fast results, it oversimplifies reality by considering only two criteria (time and cost), leaving out safety and environmental impacts. Study [2] proposed a method for cold-chain logistics that considers temperature risks and seasonal fluctuations. Although the approach is practical, its validation using only the Chengdu–Shanghai route limits its generalizability. Authors of [6] optimized the transportation of dangerous goods using fuzzy random variables and NSGA-II, but the computational complexity makes the model difficult to apply in practice. Works [7, 8] incorporate fuzzy demand and time windows, which increases adaptability but also makes the results sensitive to the choice of membership functions.

Risk management remains a key component of reliable multimodal systems. In [9], the authors used fuzzy-FMEA to identify critical risk points in multimodal transportation. The method structures risks effectively but relies heavily on subjective expert assessments. The comprehensive risk analyses presented in [10] used Bayesian networks to model risks at transport hubs, revealing that organizational failures often outweigh technical ones. However, the complexity of these models makes practical implementation difficult. A regional example is presented in [11], where a fuzzy risk management model was proposed for agricultural routes between Ukraine and Poland. While useful, the model does not consider political or military factors, which are critical for the region. Study [12] proposed a Reliability-Oriented Route Algorithm that accounts for the probability of network failure. It is promising for practical planning, but it has only been tested within the Yangtze Delta, limiting its applicability.

The integration of digital technologies into transportation opens new opportunities for forecasting and management. A transport digital twin combined with deep learning was introduced in [13], significantly improving travel-time prediction accuracy. However, the approach requires extensive data and computational resources. Physics-informed learning, described in [14], integrates graph neural networks with the Kalman filter — an innovative method still in early stages. A multimodal infrastructure sensor system for safety assessment was proposed in [15], but its high cost and regulatory barriers pose limitations.

These technological developments demonstrate a clear trend: the future of multimodal systems lies in combining transport infrastructure with artificial intelligence. However, the human factor remains significant in transport decision-making. A combined behavioral analysis in [16] showed that even short walking segments can drastically

reduce route attractiveness, indicating the need to integrate behavioral models into transport simulations. Group decision-making approaches in [17, 18] applied MULTIMOORA with a trapezoidal cloud model to determine optimal container routes. Although methodologically advanced, such approaches are too complex for practical use by carriers. Therefore, integrating behavioral factors remains limited and requires balancing model complexity with real-world applicability.

Purpose and task statement

The purpose of this study is to identify the specific features of organizing multimodal transportation in Ukraine, analyze existing problems and development prospects amid modern challenges— including the growth of international trade and the impact of military conditions— and develop approaches for minimizing risks during such transportation.

This research provides a comprehensive analysis of multimodal transportation in Ukraine and seeks to address the following objectives:

- 1) assess the current state of multimodal transportation development in Ukraine, including an analysis of the legislative framework and relevant international agreements;
- 2) identify key issues hindering effective multimodal transportation, such as infrastructure limitations, an imperfect regulatory framework, and the impact of military operations;
- 3) examine the practical experience of companies engaged in multimodal transportation in Ukraine and analyze commonly used logistics routes;
- 4) develop a mathematical model to assess and minimize risks associated with unforeseen events during multimodal transportation.

Materials and methods

The object of the study is the process of organizing multimodal cargo transportation in Ukraine in the context of integration into international transport systems and increasing external risks. The subject of the study is the methods, models, and organizational-technological mechanisms for optimizing multimodal transportation under uncertainty caused by military, economic, and infrastructural factors.

The research methods include:

- analysis and synthesis of scientific publications and regulatory documents;
- comparative analysis of logistics schemes used by leading companies;
- statistical analysis of transportation volumes for 2021–2024 based on data from the Ukrainian Sea Ports Authority (USPA);
- stochastic modeling to assess transport route risks;
- scenario analysis for evaluating the effectiveness of alternative logistics solutions.

Research tools include:

- analytical data from international logistics companies (DB Schenker, Maersk, DSV, DHL, Nova Global, Kuehne+Nagel, Meest Express);
- statistical reports from the State Statistics Service of Ukraine;
- software tools for stochastic model development (Python, Excel Solver);
- visualization tools for plotting route variations and delivery risks.

Summary of the main material

In Ukraine, multimodal cargo transportation involving road, rail, and maritime modes is currently the most widely used [19-20]. Well-known companies engaged in multimodal transportation, which remain active today, are summarized in Table 1 [21-23].

Table 1

Companies that provide multimodal transportation to Ukraine

Company	Services	Offices / Coverage
DB Schenker	solutions, warehousing, transportation to/from Ukraine	Poland, Germany, Ukraine
Maersk Logistics	Sea container transportation + land delivery	Poland, Romania, Ukraine
DSV Global Transport	Multimodal transportation, customs clearance	EU warehouse, Lviv, Kyiv
DHL Global Forwarding	Air, road, rail logistics, express delivery	Warsaw, Kyiv
Nova Global (Нова Пошта)	Auto + international logistics to Ukraine (from B2B to individual cargo)	Ukraine, Poland, Germany
Kuehne+Nagel	Warehouse + logistics + multimodal solutions	EU + support for Ukraine
Meest Express	Delivery from EU, USA, Canada, China to Ukraine	Focus on humanitarian, commercial cargo

The primary challenges facing multimodal transportation are linked to infrastructural deficiencies.

The absence of fully integrated transport hubs (intermodal terminals) and uneven infrastructure development across regions limit the capacity of railway and port facilities.

In addition, incompatibilities between transport systems – such as varying track gauges and differences in

container standards – complicate the seamless integration of transport modes.

A significant challenge is the lack of unified IT systems for cargo tracking. This restricts the implementation of electronic document management, while the absence of real-time cargo monitoring systems leads to delays. These are further exacerbated by weather conditions, strikes, vehicle breakdowns, and other factors.

Differences in customs and tax regulations between countries create complex cross-border procedures that slow down delivery. This is mainly due to insufficient harmonization of legal frameworks. As a result, additional costs arise from transshipment, storage, and logistics coordination.

Multimodal transportation under wartime conditions in Ukraine has distinct features that significantly affect logistics, safety, and transportation costs [24–26]. Analysis shows that Ukraine's seaports – especially those in the south, such as Odesa, Mykolaiv, and Kherson – are partially or fully blocked or operate with severe restrictions. Air cargo transport has been suspended entirely due to the closure of Ukrainian airspace. Rail and road transport have therefore become the primary channels for imports, creating heavy pressure on western border crossings. Logistics routes have shifted toward Western countries, with Poland, Slovakia, Hungary, Romania, and Moldova serving as the main gateways. Delivery times have increased due to congestion and customs delays.

Significant security risks have emerged because of ongoing missile threats to infrastructure (rail lines, bridges, warehouses). This has necessitated high-risk insurance premiums (war risk insurance) and the selection of alternative, safer routes – even if longer. Some logistics facilities in the east and south have been damaged or temporarily rendered inaccessible.

The Ukrainian government has simplified several procedures, particularly for humanitarian cargo, equipment, and medical supplies. However, temporary bureaucratic delays still occur due to staff shortages, power outages, and occasional sabotage. There is also a continued need to revise regulations and import procedures, especially for dual-use goods.

At the same time, demand for critical cargo remains very high. Transport companies often prioritize the movement of humanitarian aid, military goods, and medical supplies [27]. This can delay or increase costs for commercial freight. International logistics companies with experience operating in crisis regions – such as DHL, DB Schenker, Maersk, and DSV – remain active. The relative intensity of logistics routes in 2024 compared with 2021 is shown in Fig. 1.

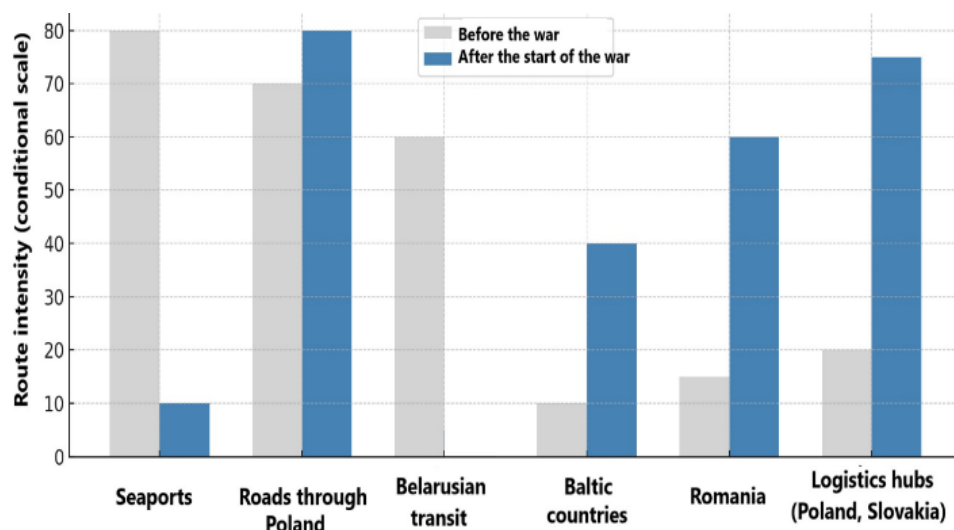


Fig. 1 – Change in delivery routes to Ukraine before and after the start of the war (based on sources [19-26])

According to the State Enterprise «USPA», Ukrainian seaports set a new record in 2024 by handling 97.2 million tons of cargo. This significantly exceeds the 2023 figure of 62 million tons and demonstrates the recovery and further development of maritime logistics in Ukraine despite the difficult geopolitical environment [28].

Changes in cargo volumes during 2022–2024, based on financial reports [29], are shown in Fig. 2 in thousand UAH. As can be seen, nearly 90% of pre-war delivery volumes have now been restored by redirecting cargo flows through alternative logistics hubs. Summary information on the cargo turnover of Ukrainian seaports in 2024 is provided in source [28] and illustrated in Fig. 3.

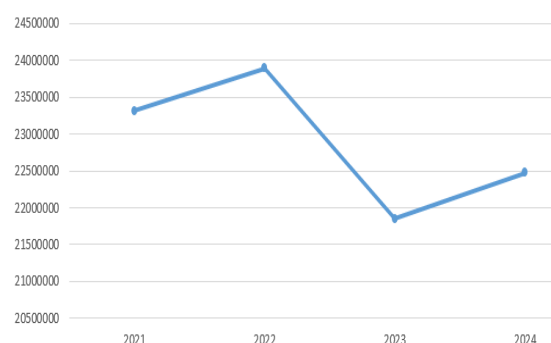


Fig. 2 – Dynamics of multimodal transportation volumes to Ukraine (based on source [29] for 2021-2024)

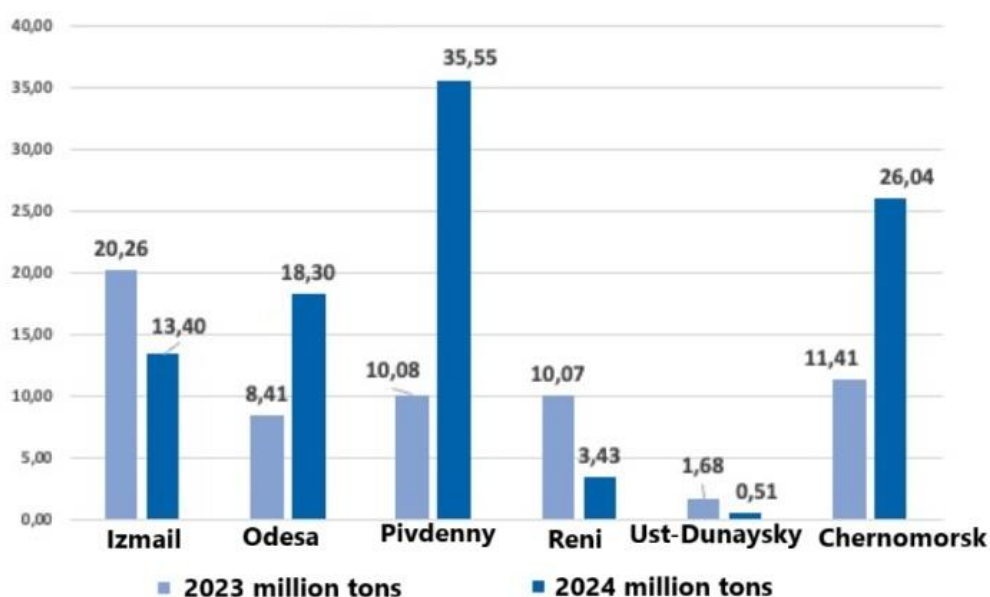


Fig. 3 – Cargo turnover of Ukrainian ports in 2024 (Source [28])

Let us consider possible examples of multimodal delivery routes to Ukraine and summarize them in Table 2.

Table 2

Examples of multimodal delivery routes to Ukraine

Multimodal route	Routes	Application
Sea + rail + road (via Poland)	By sea: Shanghai (China) → Port of Gdansk (Poland); By rail: Gdansk → Medika (PL) – Mostyska (UA); By car: Mostyska → Lviv → Kyiv / Dnipro / Kharkiv	delivery of equipment, clothing, building materials
Sea + road (via Romania)	By sea: Istanbul → Port of Constanta (Romania) By car: Constanta → Galati → Izmail → Odesa	cargo, food industry, agricultural sector
Aviation + automotive	Air: New York / Frankfurt → Warsaw Car: Warsaw → Yagodyn → Lutsk → Kyiv	express delivery of small batches, medical equipment, electronics

A mathematical model of transportation under uncertainty has been developed to minimize delivery time or cost while accounting for the probability of unforeseen events during transportation (military risks, weather disruptions, route blockages, etc.). The model is formulated as a stochastic optimization problem for a single transportation process.

The objective function aims to minimize the total expected cost or delivery time, incorporating the probability of disruptions:

$$\min \sum_{i,j} x_{ij} [c_{ij} + r_{ij} \cdot \delta_{ij}], \quad (1)$$

where

x_{ij} – binary variable: 1 if the route between points i and j is used, 0 – otherwise.

c_{ij} – the basic cost or transportation time between points i and j .

r_{ij} – probability of a risky event occurring on route i and j (in the form of probability).

δ_{ij} – additional costs or time delay in the event of a risk occurring on the route i and j .

Alternatively, for many scenarios we get:

$$\min \sum_s p_s Z_s, \quad (2)$$

p_s – probability of scenario s (e.g., blockage, accident, shelling, breakdowns, etc.).

Z_s – total cost or transportation time in the scenario s .

$$\sum_{i,j} x_{ij} \cdot r_{ij} \leq R_{max}, \quad (3)$$

x_{ij} – binary variable: 1 if the route between points i and j is used, 0 otherwise.

r_{ij} – the probability of a risky event occurring on route i and j (in the form of probability).

R_{max} – maximum permissible level of risk.

This model can be further extended to include delivery time windows, intermediate transshipment nodes, and

multiple transport modes in multimodal logistics chains.

To assess route-related risks, a simulation was carried out based on statistical data on the performance of different route segments.

A full Python script was developed to simulate delivery times under uncertainty, incorporating random events such as roadblocks, inspections, and infrastructure risks. The program also generates a graph and exports the results to an Excel file. These outputs are presented in Fig. 4 and Fig. 5.

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import random
5
6 # Model parameters
7 num_simulations = 50
8 distances = np.random.randint(100, 1000, size=num_simulations)
9 cargo_weights = np.random.randint(100, 10000, size=num_simulations)
10
11 # Delivery time coefficients
12 base_speed = 60 # km/h
13
14 # Event probabilities
15 prob_checkpoint = 0.2
16 prob_damage = 0.1
17 prob_security = 0.15
18
19 # Time delays (in hours)
20 delay_checkpoint = lambda: random.uniform(0.5, 2)
21 delay_damage = lambda: random.uniform(2, 5)
22 delay_security = lambda: random.uniform(1, 3)
23
24 # Results
25 base_times = []
26 delays = []
27 total_times = []
28
29 for d, w in zip(distances, cargo_weights):
30     base_time = d / base_speed
31     delay = 0
32
33     if random.random() < prob_checkpoint:
34         delay += delay_checkpoint()
35     if random.random() < prob_damage:
36         delay += delay_damage()
37     if random.random() < prob_security:
38         delay += delay_security()

```

Fig. 4 – Part of the program code

```

40 base_times.append(base_time)
41 delays.append(delay)
42 total_times.append(base_time + delay)
43
44 # Save to DataFrame
45 df = pd.DataFrame({
46     'Distance (km)': distances,
47     'Cargo Weight (kg)': cargo_weights,
48     'Base Time (h)': base_times,
49     'Delays (h)': delays,
50     'Total Time (h)': total_times
51 })
52
53 # Plot
54 plt.figure(figsize=(10, 6))
55 plt.scatter(distances, total_times, c='blue', label='Risk-based delivery time')
56 plt.xlabel('Distance (km)')
57 plt.ylabel('Total delivery time (hours)')
58 plt.title('Risk-based delivery time simulation')
59 plt.grid(True)
60 plt.legend()
61 plt.tight_layout()
62 plt.savefig("delivery_simulation_plot.png")
63 plt.show()
64
65 # Save to Excel
66 df.to_excel("transport_simulation_results.xlsx", index=False)
67 print("Results saved to file 'transport_simulation_results.xlsx'")

```

Fig. 5 – Part of the program code

The generated file *transport_simulation_results.xlsx* contains a table of delivery times across varying distances, with all delays caused by unexpected events included.

The simulation results are summarized in Fig. 6, which demonstrates how delivery time increases

nonlinearly with distance when disruptions—such as checkpoint delays, infrastructure damage, or security inspections—are introduced into the model. Architecture assessment metrics of program showed in Table 3.

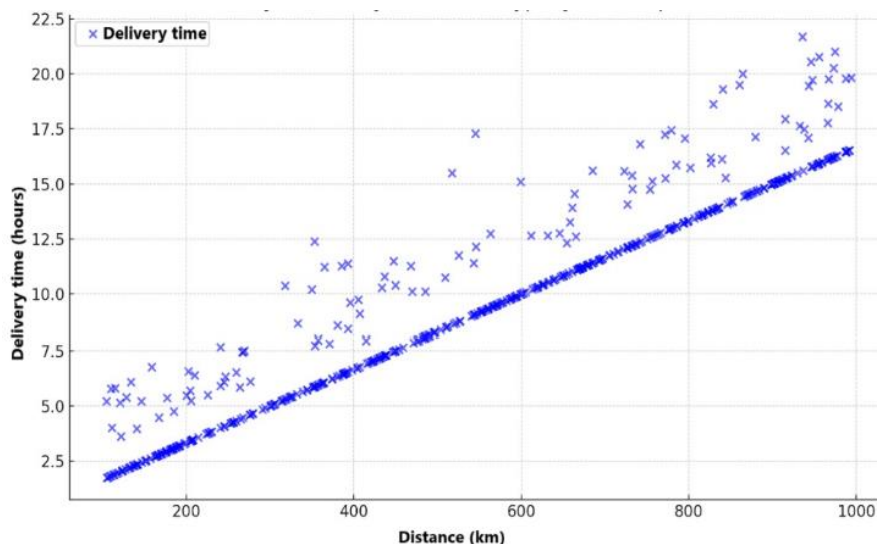


Fig. 6 – Simulation of delivery time taking into account risks (Source developed by the authors)

Table 3

Architecture assessment metrics of program

Technical	MTTR (mean time to recover) MTTD (mean time to detect) Architecture assessment metrics Factor of routes with ETA error <5% Factor of validated IoT events (data confidence level) API throughput (requests/sec)
Logistics	ETA deviation (%) Frequency of emergency situations Route resilience index Total cost of downtime
Economic	ROI, NPV, IRR Delivery cost per 1 ton of cargo Operational savings (€)

Quantitative verification of the proposed architecture of a multimodal digital system and comparison with alternative approaches

The purpose of the verification is to check whether the proposed architecture really increases the reliability and efficiency of multimodal maritime transportation in Ukrainian conditions and to compare it with alternatives.

Objective function. Minimize expected total costs over horizon T (or maximize NPV of savings)

$$\min E(C_{total}) = F[c_f \cdot u \cdot (d_1 + d_2) + c_p \cdot Q + c_h + c_{loss} + c_{dem}], \quad (4)$$

where

Q – cargo volume (t) for the considered period;

d_1, d_2 – segment distances (km), here

($d_1 = 800, d_2 = 400$);

c_f – fuel price (€/t);

u – fuel consumption (t/km).

c_p – port and transit charges (€/t).

c_h – operational costs for transshipment/handling (€/flight),

c_{loss} – cost of losses:

$$c_{loss} = L \cdot Q \cdot P_u. \quad (5)$$

P_u – unit price,

L – cargo losses (fraction);

c_{dem} – additional costs due to demurrage/penalties depending on the delay

As an alternative entry (investment approach) – maximize the NPV of the implementation:

$$NPV = \sum_{y=1}^T \frac{\Delta C_y}{(1+r)^y} - I, \quad (6)$$

where

I – investments in architecture;

r – is the discount rate;

ΔC_y – expected annual savings when implementing the system in year y .

Solution Method: Sample Average Approximation (SAA) + Monte-Carlo: generate N scenarios w_i , measure costs $C(w_i)$ and estimate $E(C) = 1/N \sum_i w_i$.

Number of iterations: $N = 500$.

To find the optimal control settings, we can use gradient methods, stochastic optimization. Consider the route:

1) section 1: $d_1 = 800$ km

2) transshipment

3) section 2: $d_2 = 400$ km

Delay probabilities before digitalization:

transport section: $P_{d1} = 0,25$, $P_{d2} = 0.22$

transshipment: $P_{hub} = 0,32$

After implementation: $\hat{P}_{d1} = 0,14$,

$\hat{P}_{d2} = 0,12$,

$\hat{P}_{hub} = 0,19$.

Delivery time:

$$T = T_1 + T_{hub} + T_2, \quad (7)$$

where each component is modeled:

$$T_i = t_i \cdot (1 + X_i), \quad (8)$$

X_i – is a random variable delay.

Base durations: $t_1 = 30$ h, $t_{hub} = 12$ h, $t_2 = 18$ h.

Average delay time before digitization: $E(\Delta T) = 11.4$ h.

After digitization: $E(\Delta T') = 5,8$ h.

Delay reduction: 49,1%.

Next, we calculate the economic variation. Assuming:

Annual volume of transportation: 600.

Investment in digitalization: €95,000.

Horizon: 5 years. $y \in [1, 5]$

Discount: 10%.

Average savings per 1 transportation is €1,050.

Annual savings is $1,050 \times 600 = €630,000$.

Then NPV:

$$NPV = \sum_{y=1}^5 \frac{630000}{(1+r)^y} - 95000,$$

$$NPV = 2\,387\,000 \text{ €}.$$

Conclusions

The conducted research shows that the development of multimodal transportation in Ukraine is a critical precondition for improving the efficiency, resilience, and competitiveness of national logistics systems. The study demonstrates that the use of integrated multimodal solutions—combining rail, road, maritime, and air transport—allows optimization of delivery time, reduction of operational costs, and mitigation of disruptions caused by infrastructure damage or geopolitical factors.

However, Ukraine's multimodal sector continues to face significant challenges, including insufficient intermodal terminal infrastructure, outdated rolling stock, limited digitalization of logistics processes, and imperfect coordination among transport modes. Addressing these issues will require not only government investment but also active engagement from private logistics operators and international partners.

The study confirms that the application of mathematical and simulation models in planning and managing multimodal transportation under uncertainty is an effective decision-support tool.

The proposed risk assessment model, implemented using Python, allows for estimating disruption probabilities, optimizing route selection, and balancing cost-time trade-offs under dynamically changing conditions. The integration of digital platforms, unified data-exchange standards, and real-time monitoring systems can greatly enhance transparency and coordination within supply chains.

In conclusion, the advancement of multimodal transportation in Ukraine should be seen not only as a logistical necessity but also as a strategic priority for post-war recovery and international trade expansion. Modernization of transport infrastructure, digital transformation of logistics operations, and the creation of resilient and adaptive transport corridors will ensure Ukraine's sustainable reintegration into the global logistics system.

References

- [1] O. L. Drozhzhyn, "Intermodalni perevezennia: varianty kompozytsii i uchast morskoho transportu" ["Intermodal transportation: composition options and the importance of maritime transport"], *Systemy ta tekhnologii – Systems and Technologies*, vol. 69, no. 1, pp. 205–212, 2025. doi: 10.32782/2521-6643-2025-1-69.24. (Ukr.)
- [2] United Nations Economic Commission for Europe, *Official Document System*. [Online]. Available: <https://unece.org/DAM/trans/wp24/wp24-reports/docu-ments/109-e.pdf>. Accessed on: September 12, 2025.
- [3] A. M. Okorokov, P. V. Bekh, and A. V. Lashkov, "Orhanizatsiia mizhnarodnykh multymodalnykh perevezhen z vrakhuvanniam ryzykiv" ["Organization of international multimodal transportation with risks in mind"], *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 283–288, 2025. doi: 10.32782/2663-5941/2025.1.1/41. (Ukr.)
- [4] Z. Xu, C. Zheng, S. Zheng, G. Ma, and Z. Chen, "Multimodal transportation route optimization of emergency supplies under uncertain conditions," *Sustainability*, vol. 16, no. 24, Art. no. 10905, 2024. doi: 10.3390/su162410905.
- [5] X. Liang, Y. Dai, L. Zhong, and G. Gong, "Seasonal cold chain multimodal transport robust optimization considering transportation time uncertainty," in *Proc. of the 7th Int. Conf. on Information Management and Management Science (IMMS '24)*, New York, USA, August 23–25, 2024, pp. 354–362. doi: 10.1145/3695652.3695677.
- [6] W. Han, H. Chai, J. Zhang, and Y. Li, "Research on path optimization for multimodal transportation of hazardous materials under uncertain demand," *Archives of Transport*, vol. 67, no. 3, pp. 91–104, 2023. doi: 10.5604/01.3001.0053.7259.
- [7] X. Yu, M. Lang, W. Wang, and X. Yu, "Multimodal transportation routing optimization considering fuzzy demands," *Journal of Beijing Jiaotong University*, vol. 42, no. 3, pp. 23–29, 2018. doi: 10.11860/j.issn.1673-0291.2018.03.004.
- [8] D. Liu, and H. Yang, "Joint slot allocation and dynamic pricing of container sea–rail multimodal transportation," *Journal of Traffic and Transportation*

- Engineering (English Edition)*, vol. 2, no. 3, pp. 198-208, 2015. doi: **10.1016/j.jtte.2015.03.008**.
- [9] K. Kaewfak, V. Ammarapala, and N. Ratisoontorn, "Risk impact assessment and prioritization in multimodal freight transportation systems," in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12482, 2020, pp. 108-121. doi: **10.1007/978-3-030-62509-2_10**.
- [10] G. Wan, D. J. Sun, B. Peng, and X. Mao, "Risk assessment of urban transportation complex hub from resilience perspective: An empirical study on Xi'an North Railway Station," *Natural Hazards Review*, vol. 25, no. 4, article 04024042, 2024. doi: **10.1061/NHREFO.NHENG-2012**.
- [11] I. Medvediev, D. Muzylyov, and J. Montewka, "A model for agribusiness supply chain risk management using fuzzy logic: Case study of grain route from Ukraine to Poland," *Transportation Research Part E*, vol. 190, article 103691, 2024. doi: **10.1016/j.tre.2024.103691**.
- [12] X. Fu, Y. Yue, H. Yang, X. Zhao, G. Jiao, and J. Wang, "Reliability-oriented route generation algorithm for multimodal transport: A perspective from supply chain reliability enhancement," *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 149, no. 5, article 04023023, 2023. doi: **10.1061/JTEPBS.TEENG-7525**.
- [13] C. Y. T. Chen, E. W. Sun, and Y.-B. Lin, "Reconciling spatiotemporal conjunction with digital twin for sequential travel time prediction and intelligent routing," *Annals of Operations Research*, vol. 348, pp. 671-716, 2025. doi: **10.1007/s10479-024-05990-x**.
- [14] N. Deshpande and H. Park, "Physics-informed deep learning with Kalman filter mixture: A new state prediction model," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 17, pp. 161-174, 2024. doi: **10.1016/j.ijtst.2024.04.002**.
- [15] N. Altekar et al., "Infrastructure-based sensor data capture systems for measurement of operational safety assessment metrics," *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, vol. 3, iss. 4, pp. 1933-1944, 2021. doi: **10.4271/2021-01-0175**.
- [16] M. N. Azadani, and A. Boukerche, "GMP: Goal-based multimodal motion prediction for automated vehicles," in *Proc. of the IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 04-08, 2023, pp. 7544-7549. doi: **10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437373**.
- [17] L. Zhao, Z. Szajnfarber, D. Broniatowski, and J.P. Helveston, "Using conjoint analysis to incorporate heterogeneous preferences into multimodal transit trip simulations," *Systems Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 438-448, 2023. doi: **10.1002/sys.21670**.
- [18] S.-P. Wan, S.-Z. Gao, and J.-Y. Dong, "Trapezoidal cloud-based heterogeneous multi-criterion group decision-making for container multimodal transport path selection," *Applied Soft Computing*, vol. 154, article 111374, 2024. doi: **10.1016/j.asoc.2024.111374**.
- [19] Trendy lantsiuhiv postavok 2024 roku: tsyfrovyi strus (Supply chain trends 2024: digital shock). [Online]. Available: <https://www.management.com.ua/tend/tend1427.html>. Accessed on: September 17, 2025. (Ukr.)
- [20] M.Yu. Hryhorak, "Tsyfrova transformatsiia lantsiuhiv postachannia yak novoho biznes-seredovyscha" ["Digital transformation of supply chains as a new business environment"], in *Proc. of the V Int. Sci.-Tech. Conf. «Business, innovation, management: problems and prospects»*, Kyiv, Ukraine, Apr. 25, 2024, pp. 213-214. (Ukr.)
- [21] K. Prytula, Y. Kalat, and I. Kyryk, "Rozvytok multymodalnykh perevezen v ukraini v umovakh hlobalnykh transformatsii svitovoi torhivli" ["The development of multimodal transportation in Ukraine in the conditions of global trade transformations"], *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy – Socio-economic problems of the modern period of Ukraine*, vol. 4, no. 156, pp. 14-21, 2022. doi: **10.36818/2071-4653-2022-4-3**. (Ukr.)
- [22] O.M. Stasiuk, "Instytutsiine seredovyshe multymodalnykh (zmishanykh) perevezen za uchastiu zaliznychnoho transportu: YeS ta Ukraina" ["Institutional environment of multimodal (combined) transport involving railways: EU and Ukraine"], *International Journal of Innovative Technologies in Economy*, vol. 2, no. 5(17), pp. 14-19, 2018. doi: **10.31435/rsglobal_ijite/01062018/5666**. (Ukr.)
- [23] Official website of "Hud Lohistyky". [Online]. Available: <https://goodlogistics.com.ua/uk/multimodalnye-perevozki/>. Accessed on: September 12, 2025.
- [24] "Official website of ZAMMLER Ukraine LLC services – transportation," [Online]. Available: <https://www.zammler.com.ua/services/perevozki/>. Accessed on: September 12, 2025.
- [25] "Official website of "UTEC Logistics" ["Official website of "UTEC Logistics" company"]. [Online]. Available: <https://utec.ua/delivery-types/multimodalne-perevezennya>. Accessed on: September 12, 2025.
- [26] EUROPLATFORMS EEIG – The European Logistics Platforms Association. [Online]. Available: <https://www.europlatforms.eu>. Accessed on: September 12, 2025.
- [27] J.V. Shuldiner, H.O. Prymachenko, S.V. Petryk, and G.S. Pashchenko, "Rozvytok multymodalnykh perevezen za suchasnykh umov" ["Development multimodal transportation in modern conditions"], *Rozvytok transportu – Transport Development*, vol. 3, no. 22, pp. 123-135, 2024. doi: **10.33082/td.2024.3-22.08**. (Ukr.)
- [28] Vantazhoobih portiv Ukrainy u 2024 rotsi dosiah rekordnoho pokaznyka 97.2 mln t (Cargo turnover of Ukrainian ports in 2024 reached a record 97.2 million tons). [Online]. Available: <https://www.uspa.gov.ua/news/vantazhoobig-portiv-ukrayiny-u-2024-roczy-dosyag-rekordnogo->

[pokaznyka-972-mln-tonn](#). Accessed on: September 12, 2025 (Ukr.)

[29] Finansovi pokaznyky DP «AMPU» [Financial indicators of the Ukrainian Sea Ports Authority]. [Online].

Available: <https://www.uspa.gov.ua/pro-pidpryyemstvo/finplan-ta-zvitnist>. Accessed on: September 12, 2025 (Ukr.)

МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ

Жищинський
Ю.С.

аспірант, Херсонська державна морська академія, Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4020-4576>, e-mail: jekas1367@gmail.com;

Шарко О.В.

д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-7990>, e-mail: mvsharko@gmail.com

У статті розглядаються перспективи організації та розвитку мультимодальних перевезень в Україні в умовах зростання міжнародної торгівлі, глибиної інтеграції в глобальні ланцюги поставок та викликів, що виникають внаслідок війни, що триває. У дослідженні наголошується на тому, що мультимодальні перевезення, що поєднують автомобільний, залізничний, морський та повітряний види транспорту, відіграють вирішальну роль у забезпеченні гнучкої та ефективної доставки вантажів, одночасно знижуючи загальні логістичні витрати. Мультимодальні перевезення в Україні стикаються зі суттєвими обмеженнями, включаючи нерозвинену інфраструктуру, брак інтегрованих інтермодальних терміналів, несумісність між транспортними системами та недосконалу нормативно-правову базу. Додаткові труднощі виникають через складні прикордонні процедури, недостатню цифровізацію логістичних процесів та обмежене використання єдиних ІТ-систем для моніторингу вантажів у режимі реального часу. Наведено огляд провідних логістичних компаній, таких як DB Schenker, Maersk, DSV, DHL, Nova Global, Kuehne+Nagel та Meest Express, які наразі працюють в Україні, використовуючи мультимодальні рішення. Особлива увага приділяється впливу війни на логістичні потоки, включаючи закриття повітряного простору України, блокування морських портів та переорієнтацію транспортних маршрутів через Польщу, Словаччину, Угорщину, Румунію та Молдову. У дослідженні наведено приклади мультимодальних маршрутів та підкреслено важливість адаптації логістичних стратегій до нових ризиків, таких як пошкодження інфраструктури та загрози безпеці. Запропоновано математичну модель для оптимізації транспортних процесів в умовах невизначеності, враховуючи непередбачувані події, такі як блокування маршрутів, несприятливі погодні умови та військові ризики. Модель сформульовано як стохастична оптимізаційна задача, яка мінімізує очікувані витрати або час доставки, враховуючи при цьому ймовірності виникнення ризику. Результати моделювання демонструють, як час доставки змінюється залежно від відстані та впливу додаткових факторів ризику. Результати підтверджують, що мультимодальні перевезення залишаються стратегічним інструментом для забезпечення ефективної участі України у світових торговельних потоках. Подолання інфраструктурних та регуляторних бар'єрів, зміцнення міжнародної співпраці та впровадження передових цифрових рішень значно підвищать ефективність та стійкість мультимодальних перевезень, сприяючи сталому економічному відновленню та інтеграції країни у світову логістичну мережу.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, оптимізація логістики, міжнародна торгівля, проблеми інфраструктури та туризму, управління ризиками.

Перелік використаних джерел

- [1] Дрожжин О.Л. Інтермодальні перевезення: варіанти композиції і участь морського транспорту. Системи та технології. 2025. Вип. 69, no. 1. С. 205-212. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.24>.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe. Official Document System. URL: <https://unece.org/DAM/trans/wp24/wp24-reports/documents/109-e.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).
- [3] Окорочков А. М., Бех П. В., Лашков О. В. Організація міжнародних мультимодальних перевезень з врахуванням ризиків. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 1, no. 1. С. 283-288. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/41>.
- [4] Multimodal transportation route optimization of emergency supplies under uncertain conditions / Z. Xu et al. Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 24. Article 10905. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162410905>.
- [5] Seasonal cold chain multimodal transport robust optimization considering transportation time uncertainty / Liang X., Dai Y., Zhong L., Gong G. Proceedings of the 2024 7th International Conference on Information Management and Management Science (IMMS '24), New York, USA, 23-25 August 2024. Pp. 354-362. DOI: <https://doi.org/10.1145/3695652.3695677>.
- [6] Research on path optimization for multimodal transportation of hazardous materials under uncertain

- demand / Han W., Chai H., Zhang J., Li Y. *Archives of Transport*. 2023. Vol. 67, no. 3. Pp. 91-104. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7259>.
- [7] Multimodal transportation routing optimization considering fuzzy demands / Yu X., Lang M., Wang W., Yu X. *Journal of Beijing Jiaotong University*. 2018. Vol. 42, no. 3. Pp. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291.2018.03.004>.
- [8] Liu D., Yang H. Joint slot allocation and dynamic pricing of container sea-rail multimodal transportation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2, no. 3. Pp. 198-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.03.008>.
- [9] Kaewfak K., Ammarapala V., Ratisoontorn N. Risk impact assessment and prioritization in multimodal freight transportation systems. *Lecture Notes in Computer Science*. 2020. Vol. 12482. Pp. 108-121. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-62509-2_10.
- [10] Risk assessment of urban transportation complex hub from resilience perspective: An empirical study on Xi'an North Railway Station / Wan G., Sun D. J., Peng B., Mao X. *Natural Hazards Review*. 2024. Vol. 25, no. 4. Article 04024042. DOI: <https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-2012>.
- [11] Medvediev I., Muzylyov D., Montewka J. A model for agribusiness supply chain risk management using fuzzy logic: Case study of grain route from Ukraine to Poland. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 190. Article 103691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103691>.
- [12] Reliability-oriented route generation algorithm for multimodal transport: A perspective from supply chain reliability enhancement / X. Fu et al. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*. 2023. Vol. 149, no. 5. Article 04023023. DOI: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-7525>.
- [13] Chen C. Y. T., Sun E. W., Lin Y.-B. Reconciling spatiotemporal conjunction with digital twin for sequential travel time prediction and intelligent routing. *Annals of Operations Research*. 2025. Vol. 348. Pp. 671-716. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05990-x>.
- [14] Deshpande N., Park H. Physics-informed deep learning with Kalman filter mixture: A new state prediction model. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2024. Vol. 17. Pp. 161-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.04.002>.
- [15] Infrastructure-based sensor data capture systems for measurement of operational safety assessment metrics / N. Altekari et al. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*. 2021. Vol. 3, iss. 4. Pp. 1933-1944. DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0175>.
- [16] Azadani M. N., Boukerche A. GMP: Goal-based multimodal motion prediction for automated vehicles. *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 04-08 December 2023. Pp. 7544-7549. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437373>.
- [17] Using conjoint analysis to incorporate heterogeneous preferences into multimodal transit trip simulations / Zhao L., Szajnfarber Z., Broniatowski D., Helveston J. P. *Systems Engineering*. 2023. Vol. 26, no. 4. Pp. 438-448. DOI: <https://doi.org/10.1002/sys.21670>.
- [18] Wan S.-P., Gao S.-Z., Dong J.-Y. Trapezoidal cloud-based heterogeneous multi-criterion group decision-making for container multimodal transport path selection. *Applied Soft Computing*. 2024. Vol. 154. Article 111374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111374>.
- [19] Тренди ланцюгів поставок 2024 року: цифровий струс. URL: <https://www.management.com.ua/tend/tend1427.html> (дата звернення: 17.09.2025).
- [20] Григорак М. Ю. Цифрова трансформація ланцюгів постачання як нового бізнес-середовища. *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*: збірник тез доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 25 квітня 2024. С. 213-214.
- [21] Пригула Х. М., Калат Я. Я., Кирик І. М. Розвиток мультимодальних перевезень в Україні в умовах глобальних трансформацій світової торгівлі. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2022. Вип. 4(156). С. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.36818/2071-4653-2022-4-3>.
- [22] Стасюк О. М. Інституційне середовище мультимодальних (змішаних) перевезень за участю залізничного транспорту: ЄС та Україна. *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2018. Вип. 2, № 5(17). С. 14-19. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ijite/01062018/5666.
- [23] Офіційний сайт логістичної компанії «Гуд Логістик». URL: <https://goodlogistics.com.ua/uk/multimodalnye-perevozki/> (дата звернення: 12.09.2025).
- [24] Офіційний сайт ТОВ «ЗАММЛЕР УКРАЇНА». URL: <https://www.zammler.com.ua/services/perevozki/> (дата звернення: 12.09.2025).
- [25] Офіційний сайт логістичної компанії «UTEC Logistics». URL: <https://utec.ua/delivery-types/multimodalne-perevezennya> (дата звернення: 12.09.2025).
- [26] Офіційна сторінка EUROPLATFORMS EEIG The European Logistics Platforms Association. URL: <https://www.europlatforms.eu> (дата звернення: 12.09.2025).
- [27] Розвиток мультимодальних перевезень за сучасних умов / Шульдінер Ю. В., Примаченко Г. О., Петрик С. В., Пашенко Г. С. *Розвиток*

транспорту. 2024. Вип. 3(22). С. 123-135. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.08>.

- [28] Вантажообіг портів України у 2024 році досяг рекордного показника 97,2 млн т. URL: <https://www.uspa.gov.ua/news/vantazhoobig-portiv-ukrayiny-u-2024-rocz-i-dosyag-rekordnogo-pokaznyka-972-mln-tonn> (дата звернення: 12.09.2025).

- [29] Фінансові показники ДП «АМПУ». URL: <https://www.uspa.gov.ua/pro-pidpryyemstvo/finplan-ta-zvitnist> (дата звернення: 12.09.2025)

Стаття надійшла 27.10.2025

Стаття прийнята 15.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Zhyshchynskyi Y. S., Sharko O. Multimodal transportation risk modeling in Ukraine. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 244-254. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351136>.

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

Редакція журналу «Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки» приймає до розгляду оригінальні наукові статті відповідно до тематики видання. Подання рукопису до редакції означає згоду авторів з редакційною політикою журналу, принципами наукової та академічної доброчесності, а також вимогами чинного законодавства України. Автори несуть повну відповідальність за зміст поданих матеріалів, достовірність наведених результатів, коректність цитувань і посилань.

Журнал забезпечує відкритий доступ до всіх опублікованих статей і випусків. Усі матеріали є вільно доступними для користувачів без обмежень. Статті публікуються на умовах ліцензії Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0), що дозволяє вільне використання, поширення та відтворення матеріалів за умови обов'язкового зазначення авторства та джерела публікації. Автори зберігають право розміщувати підготовлену до публікації версію статті в наукових репозитаріях з відкритим доступом, що сприяє ширшому розповсюдженню результатів досліджень та підвищенню їх наукової видимості.

Усі подані до журналу рукописи проходять обов'язкову перевірку на наявність текстових запозичень із використанням спеціалізованих програмних засобів. Матеріали, що містять ознаки плагіату, самоплагіату, фабрикації або фальсифікації даних, а також інші порушення принципів академічної доброчесності, до публікації не приймаються.

Журнал підтримує принципи відкритих дослідницьких даних та FAIR-підхід. Авторам рекомендується розміщувати дослідницькі дані, що лежать в основі публікацій, в інституційних, національних або міжнародних репозитаріях дослідницьких даних з присвоєнням DOI та зазначенням його в метаданих статті. У випадках, коли надання даних неможливе з етичних, правових або інших обґрунтованих причин, автори повинні зазначити це у заяві про доступність даних.

У разі подання матеріалів, що містять результати досліджень із залученням людей, тварин, їх біологічних матеріалів, персональних або конфіденційних даних та підпадають під дію відповідного законодавства України, автори зобов'язані надати підтвердження отримання обов'язкового висновку відповідної етичної комісії або іншого уповноваженого органу. Відсутність такого підтвердження є підставою для відхилення матеріалу.

Усі статті, подані до журналу, проходять обов'язкове наукове рецензування. У «Віснику Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки» застосовується процедура подвійного сліпого рецензування (double-blind peer review), за якої автори не поінформовані про особи рецензентів, а рецензенти – про особи авторів. Такий підхід спрямований на забезпечення об'єктивності, неупередженості та високого наукового рівня публікацій. Рецензування здійснюється незалежними фахівцями у відповідній галузі знань. За результатами рецензування стаття може бути рекомендована до публікації, повернена авторам на доопрацювання або відхилена. Остаточне рішення щодо публікації матеріалу ухвалюється редакційною колегією журналу.

Автори зобов'язані повідомляти редакцію про наявність або відсутність потенційного конфлікту інтересів, що може вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. До конфлікту інтересів можуть належати фінансові, професійні чи особисті взаємовідносини, пов'язані з тематикою дослідження. За відсутності конфлікту інтересів автори повинні зазначити про це у відповідній заяві в статті. Відповідальність за повноту та достовірність інформації щодо конфлікту інтересів покладається на авторів.

Автори зобов'язані прозоро повідомляти про будь-яке застосування інструментів штучного інтелекту під час підготовки рукопису. Використання інструментів штучного інтелекту допускається виключно як допоміжне та обмежується мовною і стилістичною редактурою, технічним форматуванням, створенням візуалізацій або ілюстративних матеріалів, а також попереднім статистичним аналізом даних. Неприпустимим є використання штучного інтелекту для створення наукових результатів, фабрикації чи фальсифікації даних, автоматичної генерації наукових текстів без належної перевірки та редагування, а також для обходу вимог академічної доброчесності. Штучний інтелект не може вважатися автором або співавтором статті, а вся відповідальність за зміст наукової праці покладається виключно на людських авторів. У разі використання інструментів штучного інтелекту це має бути зазначено у тексті статті або відповідній примітці.

Редакція залишає за собою право відхиляти матеріали, що не відповідають вимогам журналу, редакційній політиці або принципам наукової та академічної доброчесності.