

**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 53. Том 1

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2026

**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 53. Volume 1

Section: Technical sciences

Dnipro, 2026

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2026. Вип. 53, том 1. 269 с. DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.

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 Vrublevskyi

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, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

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

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

д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет, Україна
канд. техн. наук, доц., Державний університет інфраструктури та техно-
логій, Україна

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

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

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

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

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

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

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

коректор, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

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

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

E-mail: vestnik.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 № 9 від 26.03.2026 р.

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

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2026

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

**Балалаєва О.Ю., Марченко І.Ф.,
Браткевич В.П.**

Дослідження ефективності мобільного керування харчовими ресурсами з використанням інтелектуальної системи на базі архітектури SWIFTUI та моделей LLM

7

**O.Yu. Balalaieva, I.F. Marchenko,
V.P. Bratkevych**

Research on the effectiveness of mobile food resource management using an intelligent system based on SWIFTUI architecture and LLM models

Prokopenko R., Poluektova N.

Application of AI-based forecasting algorithms to improve the reliability of solar diverters

16

R. Prokopenko, N. Poluektova

Application of AI-based forecasting algorithms to improve the reliability of solar diverters

Сергієнко А.В., Тригуб В.П.

Дослідження та розробка хмарноорієнтованої вебсистеми на основі стеку MERN для предиктивної діагностики автотранспорту за показниками енергоефективності

23

A. Serhiienko, V. Tryhub

Research and development of a MERN-based cloud-oriented web system for predictive vehicle diagnostics based on energy efficiency indicators

**Морозова А.І., Новоселова А.С.,
Петрова Р.В.**

Інтеграція Policy Layer у NL2SQL-системи для запобігання доступу до чутливих даних

33

**A.I. Morozova, A.S. Novoselova,
R.V. Petrova**

Integration of a Policy Layer into NL2SQL systems to prevent unauthorized access to sensitive data

Лупаренко О.В.

Графічні методи дослідження фазових траєкторій неперервних дисипативних динамічних систем у середовищі MATLAB

43

O.V. Luparenko

Graphical methods for investigating phase trajectories of continuous dissipative dynamical systems in the MATLAB environment

Романенко С.О.

Метод визначення ймовірного походження та ліцензійних умов програмного коду, згенерованого великими мовними моделями

54

S.O. Romanenko

Method for determining the probable origin and license conditions of program code generated by large language models

Проніна О.І., Перцев Є.А.

Порівняльний аналіз алгоритмів машинного навчання в задачах підтримки прийняття рішень щодо академічної успішності

61

O.I. Pronina, Ye.A. Pertsev

A comparative analysis of machine learning algorithms for decision support in predicting academic performance

Затуловський Г.А., Піднебесна Г.А.

Система розпізнавання змісту медичних аудіозаписів для заповнення медичної документації

69

H.A. Zaturovskyi, H.A. Pidnebesna

Medical audio recording content recording system for completing medical documentation

Левицька Т.О., Носовська С.Є.

Імітаційна модель електронного нелінійного осцилятора для генерації високоентропійних послідовностей у задачах захисту інформації

76

T.O. Levytska, S.Ye. Nosovska

Simulation model of an electronic nonlinear oscillator for high-entropy sequence generation in information security problems

Чичкар'ов Є.А., Семенов О.В.

Розпізнавання зображень за допомогою гібридного підходу до на основі мультимодальних великих мовних моделей та згорткових нейронних мереж

85

Y.A. Chychkarov, O.V. Semenov

Image recognition using a hybrid approach based on multimodal large language models and convolutional neural networks

Кривенко О.В., Камінський Б.В.

Архітектурно-алгоритмічне забезпечення безпеки та надійності інтелектуальної системи прогнозування криптовалютних ризиків на базі хмарних платформ AWS та протоколу HTTPS

92

O.V. Kryvenko, B.V. Kaminsky

Architectural and algorithmic provision of security and reliability for an intellectual system of cryptocurrency risk forecasting based on AWS cloud platforms and the HTTPS protocol

Суслов В.М.

Реалізація та формальний опис стекової віртуальної машини як об'єктно-орієнтованої моделі для вивчення технологій компіляції

103

V.M. Suslov

Implementation and formal description of a stack-based virtual machine as an object-oriented model for studying compilation technologies

Воротнікова З.Є.

Підходи та методи до оптимізації продуктивності систем управління базами даних у сучасних інформаційних системах

109

Z.J. Vorotnikova

Approaches and methods to optimizing the productivity of database management systems in modern information systems

Дегтярьова Л.М.

Інтелектуальні технології оцінювання ремонтних робіт: інтеграція LiDAR та штучного інтелекту

120

L.M. Dehtiarova

Intelligent technologies for renovation assessment: integrating LiDAR and artificial intelligence

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

APPLIED MECHANICS

Карпенко Т.М., Шишкін В.В.

До питань міцності в системах, що виконують вимушені коливання при наявності лінійного в'язкого опору

128

T.M. Karpenko, V.V. Shishkin

On strength issues in systems performing forced vibrations in the presence of linear viscous resistance

Перемітько В.В., Коломоєць І.В., Носов Д.Г., Чумак М.С., Давидюк А.В.

Стабілізація конфігурації кромок тонкостінних деталей при їх наплавленні або зварюванні по торцю

137

V.V. Peremitko, I.V. Kolomojets, D.G. Nosov, M.S. Chumak, A.V. Davydyuk

Stabilization of the edge configuration of thin-walled parts during their fusing or butt welding

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

Бармін О.Є., Григор'єва С.В.

Дослідження кінетики борування на середньовуглецевій сталі

145

O.Y. Barmin, S.V. Hryhorieva

Kinetics study of boronizing on medium-carbon steel

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

**Пополов Д.В., Засельський В.Й.,
Учитель О.Д., Швед С.В.,
Засельський І.В., Зелова К.Є.**
Промислові дослідження роботи вібраційно-сортувальних машин з сіючою поверхнею ударної дії

154

**D.V. Popolov, V.Y. Zaselskyi,
O.D. Uchytel, S.V. Shved,
I.V. Zaselskyi, K.Ye. Zielova**
Industrial studies of the operation of vibrating screening machines with an impact-action screening surface

**Слабий О.О., Гриджук А.С.,
Дмитрієв І.В., Суглобов В.В.,
Русаченко О.В.**
Дослідження навантаженості ковша облицьованого гумотканними матами при навантаженні сипучих матеріалів

162

**O.O. Slaby, A.S. Gridzhuk,
I.V. Dmytriv, V.V. Suglobov,
O.V. Rusachenko**
Tresearch on the loading of a bucket lined with humid mats when loading bulk materials

Попов С.В., Скоряк Ю.Б.
Експериментальна оцінка ефективності конструкції молоткової дробарки

170

S.V. Popov, Y.B. Skoriak
Experimental evaluation of the efficiency of the hammer mill design

Зенкін М.А., Ремезовський О.М.
Наукове обґрунтування комбінованих технологій обробки поверхонь відповідальних деталей друкарського обладнання для подовження їх ресурсу

178

M.A. Zenkin, O.M. Remezovskiy
Scientific substantiation of combined surface treatment technologies for critical printing equipment components to extend their service life

Ясенчук В.В., Гулієнко С.В.
Новітні досягнення в дослідженні гідродинаміки мембранних каналів: критичний огляд

188

V.V. Yasenchuk, S.V. Hulienko
Recent advances in the investigation of membrane channel hydrodynamics: a critical review

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

**Chuprynov Ye.V., Kassim D.A.,
Hrybkov E.P., Malii Kh.V., Rekov Yu.V.**
Development of the service for calculating the material and thermal balance of steel smelting

206

**Ye.V. Chuprynov, D.A. Kassim,
E.P. Hrybkov, Kh.V. Malii, Yu.V. Rekov**
Development of the service for calculating the material and thermal balance of steel smelting

Пашинська О.Г.
Дослідження процесів старіння холоднокатаного прокату з киплячих марок сталі

214

O. Pashynska
Research into the ageing processes of cold-rolled products made from boiling steel grades

**Чубенко В.А., Ярош Т.П.,
Хіноцька А.А.**
Удосконалення процесу виготовлення металевих виробів у машинах безперервного лиття заготовок

222

**V.A. Chubenko, T.P. Yarosh,
A.A. Khinotska**
Improvement of the production process of metal products in continuous casting machines

Панченко Г.М., Іванов А.С.

Аналіз конструкційних особливостей литих колосників як фактор інтенсифікації теплообміну в конвеєрних агрегатах термозміцнення металургійної сировини

230

H.M. Panchenko, A.S. Ivanov

Analysis of design features of cast grates as a factor for intensifying heat transfer in conveyor units for sintering metallurgical raw materials

**Пантейков С.П., Романенко А.А.,
Бондаренко Я.І., Лопушин О.М.**

Термодинамічний аналіз умов перебігу процесів науглецювання заліза твердим вуглецем при відновленні з вюститу

243

**S.P. Panteikov, A.A. Romanenko,
Ya.I. Bondarenko, O.M. Lopushyn**

Thermodynamic analysis of the conditions for carburization processes of iron by solid carbon during reduction from wüstite

**Чернятевич А.Г., Сізарьов Є.М.,
Похвалітій А.А.,
Кондрашенков Д.С., Вовк А.О.**

Порівняльна оцінка ефективності попереднього підігріву металобрухту в кисневому конвертері при використанні кускового та пиловугільного палива

258

**A.G. Chernyatevych, E.M. Siharov,
A.A. Pokvalitii, D.S. Kondrashenkov,
A.O. Vovk**

Comparative evaluation of the efficiency of scrap metal preheating in an oxygen converter using lump coal and pulverized coal fuel

ДО УВАГИ АВТОРІВ

269

INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.414:004.8:613.2

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359758

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОБІЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ХАРЧОВИМИ РЕСУРСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ АРХІТЕКТУРИ SWIFTUI ТА МОДЕЛЕЙ LLM

Балалаєва О.Ю.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-4399 , e-mail: balalaeva_e_u@pstu.edu ;
Марченко І.Ф.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4566-3866 , e-mail: marchenko_i_f@pstu.edu ;
Браткевич В.П.	магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: bratkevych_v_p@students.pstu.edu

У роботі наведено результати розробки та апробації мобільної інтелектуальної системи «FridgeChief», призначеної для автоматизації управління харчовими ресурсами домогосподарств. Програмний продукт реалізовано в середовищі Xcode з використанням мови Swift та фреймворків SwiftUI і SwiftData, що забезпечує нативну продуктивність та ефективне керування локальними базами даних інгредієнтів. Ключовою технологічною особливістю додатка є інтеграція з OpenAI API, що дозволяє використовувати моделі GPT-4 Turbo для динамічної генерації рецептур та DALL-E 3 для їх візуалізації. В ході дослідження обґрунтовано архітектуру системи, яка реалізує безшовну взаємодію між локальним інвентарем та хмарними LLM-моделями. Функціонал застосунку забезпечує детальний аналіз наявних продуктів і врахування широкої матриці дієтичних обмежень: веганство, вегетаріанство, безглютенову, безлактозну, палео-, кето- та низьковуглеводну дієти. Згенеровані рекомендації включають назву страви, час приготування, рівень складності, перелік компонентів та покрокові інструкції. Реалізовано механізм збереження рецептів на пристрої та алгоритм варіативності, що виключає дублювання страв при однаковому наборі інгредієнтів. Експериментальна верифікація протягом 30 днів підтвердила високу працездатність обраного технологічного стека. Впровадження системи дозволило скоротити обсяг харчових відходів на 64%, а загальний рівень утилізації продуктів знизився з 26,8% до 9,6%. Зафіксовано оптимізацію продуктових витрат користувачів на 25,7%. Поведінковий аналіз показав зниження частоти непланових закупок у 2,5 рази, тоді як суб'єктивна оцінка якості планування раціону зросла у 2,2 рази. Доведено, що використання генеративного ШІ в нативних мобільних інтерфейсах є ефективним інструментом впровадження концепції «zero-waste» через точну персоналізацію та мінімізацію часових витрат на планування.

Ключові слова: штучний інтелект; машинне навчання; мобільний додаток; генеративні моделі; планування раціону; управління харчовими ресурсами; мінімізація відходів; Swift; OpenAI API; zero-waste.

Постановка проблеми

У реаліях сьогодення проблема раціонального споживання ресурсів набуває глобального масштабу. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO) щорічно втрачається або викидається близько однієї третини всіх харчових продуктів, вироблених для споживання людиною. Це не лише спричиняє значні економічні збитки для домогосподарств, а й створює колосальне навантаження на екологію через викиди парникових газів на сміттєзвалищах та неефективне використання орних земель і води.

Однією з ключових причин виникнення харчових відходів на рівні кінцевого споживача є відсутність ефективних інструментів для моніторингу наявних запасів продуктів та складність оперативного планування раціону на їх основі. Користувачі часто купують

зайві товари або не встигають використати ті, що вже є в наявності, до закінчення терміну їх придатності. Традиційні методи контролю (паперові списки, замітки) є незручними, а стандартні мобільні додатки з рецептами зазвичай не враховують індивідуальні запаси конкретного користувача в режимі реального часу.

Актуальним завданням є створення інтелектуальної системи, яка б не просто автоматизувала облік продуктів, а й пропонувала персоналізовані рішення (рецепти, плани харчування), адаптовані під конкретний перелік наявних продуктів, а також дієтичні потреби або вподобання людини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблема управління харчовими ресурсами та автоматизації раціону за останні роки змістилася з

простого хмарного обліку в бік використання генеративного штучного інтелекту та комп'ютерного зору. Класифікація існуючих рішень дає змогу виділити три основні напрями досліджень.

По-перше, це використання комп'ютерного зору для ідентифікації продуктів. Важливою складовою є автоматизація введення даних, адже ручне введення переліку продуктів є головним бар'єром для користувачів. У роботі [1] представлено систему на основі глибокого навчання, яка розпізнає типи продуктів за зображеннями з камери смартфона з точністю понад 90%. Однак авторами зазначається складність розпізнавання напівфабрикатів та продуктів у закритих упаковках.

По-друге, це генетичні та дієтологічні алгоритми персоналізації. Сучасні інтелектуальні системи мають на меті враховувати не лише наявність продуктів, а й біологічні потреби організму. У роботі [2] розглянуто інтеграцію нутрігенетичних даних у мобільні додатки, при цьому авторами показано, що персоналізація на основі ШІ дозволяє ефективніше коригувати індекс маси тіла порівняно з універсальними дієтами.

По-третє, це генеративні мовні моделі (LLM) у плануванні харчування. Розвиток LLM, зокрема архітектур GPT, відкрив нові можливості для генерації контенту. У роботі [3] підкреслено, що використання ШІ-помічників дозволяє скоротити обсяг побутових відходів на 20-30% завдяки креативному використанню інгредієнтів, які зазвичай утилізуються. Дослідження [4-7] демонструють ефективність використання ШІ для створення текстових рекомендацій, проте інтеграція таких моделей у мобільні додатки для контролю харчових ресурсів все ще перебуває на етапі становлення. Зокрема, існують проблеми з точністю обробки структурованих даних (наприклад, переведення інгредієнтів у грами чи мілілітри) та візуалізацією кінцевого результату.

Сучасний ринок FoodTech-застосунків характеризується функціональною сегментацією, що перешкоджає створенню єдиного інтелектуального середовища для раціонального споживання. Проведений аналіз дозволяє виділити декілька ключових категорій програмних продуктів та притаманні їм обмеження.

Перша категорія охоплює системи цифрового обліку інвентарю, такі як NoWaste [8] та Kitcher [9]. Дані рішення зосереджені на моніторингу термінів придатності та кількісному аналізі залишків. Проте їх ефективність нівелюється високою трудомісткістю ручного введення даних та відсутністю інструментів для подальшої кулінарної обробки зафіксованої інформації.

Другу групу становлять бази даних рецептів із функцією пошуку за інгредієнтами, зокрема SuperCook [10] та Yummlly [11]. Експлуатація цих платформ виявила їх низьку адаптивність: алгоритми базуються на жорсткому зіставленні статичних списків, що унеможливає автоматичну заміну відсутніх продуктів або врахування динамічних дієтичних потреб користувача.

Окремий сегмент займають платформи прецизійного харчування (ZOE [12], Nutrigenomix [13]), які пропонують глибоку персоналізацію на основі біометричних даних. Однак вони ігнорують побутовий контекст, не враховуючи наявність реальних харчових ресурсів у домогосподарстві. Соціальні сервіси перерозподілу надлишків, такі як Olio [14] та Too Good To Go [15], хоча і сприяють екологічній стійкості, спрямовані на зовнішню утилізацію продуктів, а не на предиктивне планування всередині системи.

Таким чином, проведений аналіз наукових джерел та існуючих програмних рішень свідчить, що попри значні успіхи у сферах комп'ютерного зору та дієтологічних алгоритмів, питання створення комплексного мобільного інструменту, який би поєднував точний облік інвентарю з креативною генерацією рецептів та їх якісною візуалізацією, залишається відкритим. Виявлений технологічний дефіцит між простими системами обліку та жорстко структурованими кулінарними базами, а також існуючий розрив між теоретичними можливостями LLM та їх практичною імплементацією в нативні мобільні застосунки, обґрунтовують необхідність розробки власної інтелектуальної системи, яка б забезпечувала безшовну інтеграцію інвентаризації та генеративного моделювання раціону на основі нових архітектурних підходів. Такий підхід дозволить вийти за межі обмежень статичних алгоритмів і забезпечити високу релевантність рекомендацій за мінімальних часових витрат користувача.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження методів машинного навчання, зокрема генеративних моделей GPT-4 та DALL-E 3, та розробка на їх основі інтелектуальної мобільної системи для iOS, яка б забезпечувала персоналізоване планування раціону, автоматизований облік харчових запасів та сприяла зменшенню обсягів харчових відходів у домогосподарствах.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставленої проблеми було розроблено архітектуру інтелектуальної системи «FridgeChief», що базується на клієнт-серверній взаємодії. Основним інструментом реалізації обрано мову Swift та платформу iOS через її високу продуктивність у роботі з локальними базами даних та широкі можливості інтеграції з API.

Головним компонентом системи є інтелектуальний агент, побудований на базі моделі GPT-4 Turbo. Вибір моделі обґрунтовано результатами тестування на точність виконання інструкцій та здатність працювати з контекстом обсягом до 128 тис. токенів.

Алгоритм функціонування системи складається з наступних кроків:

Крок 1. Збір даних: користувач вносить продукти через інтерфейс, при цьому дані зберігаються локально за допомогою фреймворку SwiftData.

Крок 2. Обробка запиту: при виборі опції «Згенерувати рецепт» система формує складний промпт, що містить: перелік наявних інгредієнтів, терміни їх придатності, дієтичні вподобання та бажану складність приготування.

Крок 3. Генерація контенту: через REST API запит надсилається до серверів OpenAI, при цьому модель повертає структуровану відповідь у форматі JSON.

Крок 4. Візуалізація: паралельно з текстом рецепта модель DALL-E 3 генерує зображення готової страви, що підвищує залученість користувача.

Розглянемо архітектурне проектування системи. Для реалізації високорівневої логіки додатка «FridgeChief» було обрано архітектурний патерн MVVM (Model-View-ViewModel). Вибір обґрунтовано необхідністю чіткого розділення стану інтерфейсу та бізнес-логіки, що особливо важливо при роботі з асинхронними потоками даних від OpenAI API.

Структура системи включає:

- Model – визначає структури даних (інгредієнти, рецепти, користувацькі профілі);
- View – реалізована на фреймворку SwiftUI, що дозволяє будувати декларативний та адаптивний інтерфейс;
- ViewModel – виконує роль посередника, обробляючи запити до сервісів III та керуючи станом локального сховища.

Центральним елементом системи є алгоритм формування персоналізованих рекомендацій. Процес генерації рецепта базується на методі Chain-of-Thought, що дозволяє моделі послідовно аналізувати вхідні дані:

- а) аналіз інвентарю – система передає масив об'єктів `FoodItem` з бази даних `SwiftData`;
- б) фільтрація за терміном придатності – алгоритм пріоритетизує продукти, що потребують негайного використання;
- в) врахування обмежень – інтеграція параметрів користувача (алергії, дієтичні типи).

Для отримання структурованої відповіді використано механізм `JSON Mode`, що дозволяє автоматично трансформувати текстову відповідь III у Swift-об'єкти без помилок парсингу.

Локальне збереження даних реалізовано за допомогою `SwiftData`. Це дозволило відмовитися від складних мапінгів `CoreData` на користь нативних Swift-деклараций. Основні сутності бази даних включають `Recipe`, `Ingredient` та `UserPreferences`.

Ключовим технічним рішенням є багатопотокова обробка запитів:

- основний потік (Main Thread) відповідає за плавність інтерфейсу;
- фонові потоки (Background Threads) виконують мережеві запити до ендпоінтів `/v1/chat/completions` (для тексту) та `/v1/images/generations` (для візуалізації страви через DALL-E 3).

Для підвищення естетичної привабливості та залученості користувача, додаток автоматично формує

запит до DALL-E 3. Промпт для генерації зображення будується динамічно на основі назви та ключових інгредієнтів згенерованого рецепта.

Програмний комплекс використовує захищене зберігання API-ключів через `Keychain`, що запобігає витоку конфіденційних даних доступу до сервісів OpenAI. Архітектура спроектована таким чином, що заміна моделі (наприклад, перехід з GPT-4 на майбутні ітерації) потребує лише оновлення константи в конфігураційному файлі, не змінюючи логіку роботи всього додатка.

Розглянемо приклад роботи інтелектуальної системи «FridgeChief» (рис. 1).

На першому етапі формується простір інгредієнтів. Після запуску додатку на мобільному пристрої під управлінням iOS відкривається головний екран. Інтерфейс спроектовано таким чином, щоб мінімізувати час на введення даних. Користувач формує вхідний набір продуктів («віртуальний холодильник») шляхом введення їх назв у текстове поле та додавання до динамічного списку. Реалізовано можливість редагування списку «на льоту»: помилково введені або непотрібні позиції видаляються стандартним жестом (`swipe-to-delete`), що дозволяє швидко змінювати умови експерименту без перезавантаження програми.

На другому етапі задається конфігурація параметрів генерації. Для перевірки гнучкості алгоритму штучного інтелекту програмне забезпечення дозволяє задавати додаткові обмежувальні фактори. Перед ініціацією запиту користувач має можливість налаштувати:

- дієтичні переваги – вибір таких специфічних режимів харчування, як, наприклад, веганське, кето-дієта, безглютенове тощо;
- енергетичну цінність – встановлення ліміту калорій на порцію, що є важливим метричним показником для оцінки адекватності роботи нейромережі.
- бюджетні обмеження – визначення цінового діапазону (Low, Medium, High), що дозволяє перевірити здатність системи адаптувати рецепти під економічні вимоги.

На третьому етапі здійснюється генерація та обробка запиту. Ініціація процесу створення рецепту відбувається натисканням керуючого елементу «Generate Recipe». У цей момент програмне забезпечення блокує інтерфейс індикатором завантаження та виконує асинхронний запит до хмарного середовища OpenAI. Система агрегує введені інгредієнти та налаштування у структурований промпт, передає його моделі GPT-4 для генерації тексту та моделі DALL-E 3 для створення візуалізації.

На четвертому етапі здійснюється візуалізація та валідація результатів. Результат роботи алгоритму відображається на окремому екрані детального перегляду. Експериментальне програмне забезпечення надає вихідні дані у структурованому вигляді (див. рис. 1):

- відображається згенерована назва, розрахунковий час приготування та складність;

– завантажується фотореалістичне зображення готової страви, що дозволяє оцінити її візуальну привабливість;

– список необхідних компонентів з їх кількісними характеристиками;

– алгоритм приготування, тобто покрокова інструкція, яка є основним об'єктом аналізу на предмет логічної зв'язності та здійсненності.

Для забезпечення можливості ретроспективного аналізу серій експериментів, програма автоматично зберігає всі згенеровані результати у локальну базу даних. Доступ до збережених рецептів здійснюється через вкладку історії. Це дозволяє порівнювати результати генерації для однакових наборів продуктів при різних параметрах налаштувань (наприклад, як змінюється рецепт для одного набору продуктів при зміні дієти з «Standard» на «Keto»).

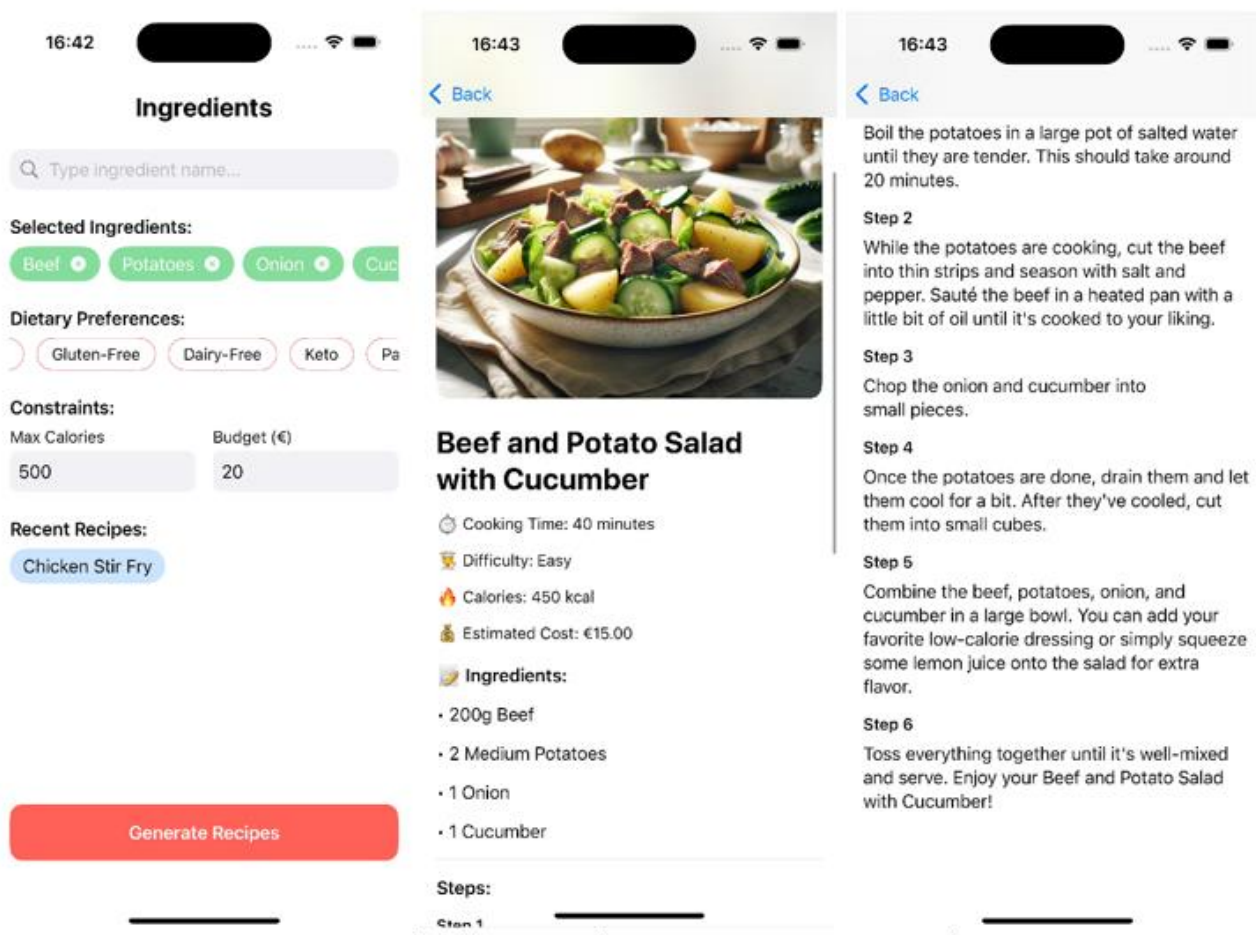


Рис. 1 – Інтерфейс додатка із згенерованим персоналізованим рецептом

Результат роботи моделі GPT-4 Turbo свідчить про високу точність контекстуальної обробки. Згенерований рецепт (рис. 1) не є статичним шаблоном, а виступає результатом динамічного синтезу на основі наявних у базі даних SwiftData інгредієнтів. Текст інструкцій характеризується логічною послідовністю та кулінарною валідністю.

Інтеграція з DALL-E 3 дозволила реалізувати функцію превізуалізації готової страви. Аналіз зображення підтверджує повну семантичну відповідність згенерованому тексту: склад страви на фото ідентичний переліку інгредієнтів. Використання фотореалістичної візуалізації високої роздільної здатності є критичним фактором для підвищення споживчої залученості та

психологічного стимулювання раціонального використання продуктів.

Застосування механізму JSON Mode при взаємодії з API OpenAI забезпечило коректну типізацію даних. Система успішно трансформувала неструктуровану відповідь неймережі у конкретні цифрові показники (час приготування, метричні одиниці інгредієнтів), що дозволяє автоматизувати подальше списання продуктів з віртуального інвентарю домогосподарства.

Для комплексної оцінки ефективності розробленої інтелектуальної системи було проведено серію експериментів, що охоплювали технічні метрики та продуктові показники якості.

Важливим етапом дослідження стало визначення оптимального технологічного базису для генерації текстового та графічного контенту. Для цього було проведено багатокритеріальне тестування 7 провідних великих мовних моделей (LLM) та 7 дифузійних моделей візуалізації. Оцінювання здійснювалося за 5-бальною шкалою на основі релевантної вибірки зі 100 тестових запитів за параметрами «ціна–якість–швидкість».

Результати порівняльного аналізу (рис. 2) свідчать про домінування моделі GPT-4 Turbo від OpenAI. Вона отримала найвищий інтегральний показник (4,5 бала), продемонструвавши виняткову точність у дотриманні складних кулінарних інструкцій та глибоке розуміння контексту (якість генерації 9,5/10).

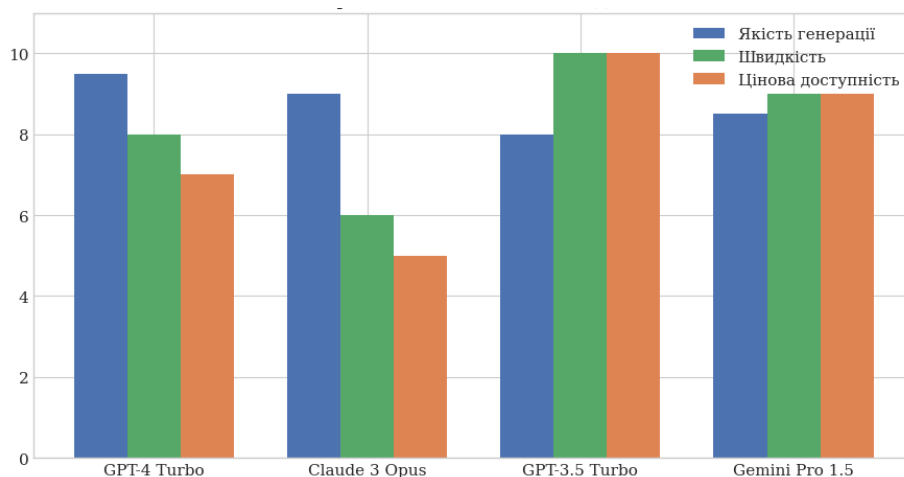


Рис. 2 – Ефективність текстових моделей

Хоча модель GPT-3.5 Turbo показала кращі результати за швидкістю відгуку (2–4 с проти 5–8 с у GPT-4) та нижчу питому вартість токенів, вона суттєво поступається у здатності формувати складні страви із обмеженого набору інгредієнтів. Моделі сімейства Claude 3 (Opus), попри високу якість, були відхилені через низьку швидкість генерації (до 10 с) та вищу вартість експлуатації, що є критичним для мобільного додатка з високою інтенсивністю запитів.

У сегменті візуалізації результатів (рис. 3) лідируючу позицію посіла модель DALL-E 3 з інтегральною

оцінкою 4,0. Головною перевагою даної моделі є висока семантична відповідність сформованому промпту – здатність «розуміти» специфічні поєднання інгредієнтів та відтворювати їх із високим ступенем фотореалістичності. Конкурентні рішення, зокрема Midjourney v6, хоча й забезпечують високу художню якість зображень, виявилися менш придатними для автоматизації через складність інтеграції через API та схильність до надмірної стилізації, що іноді спотворює реалістичне представлення страви.

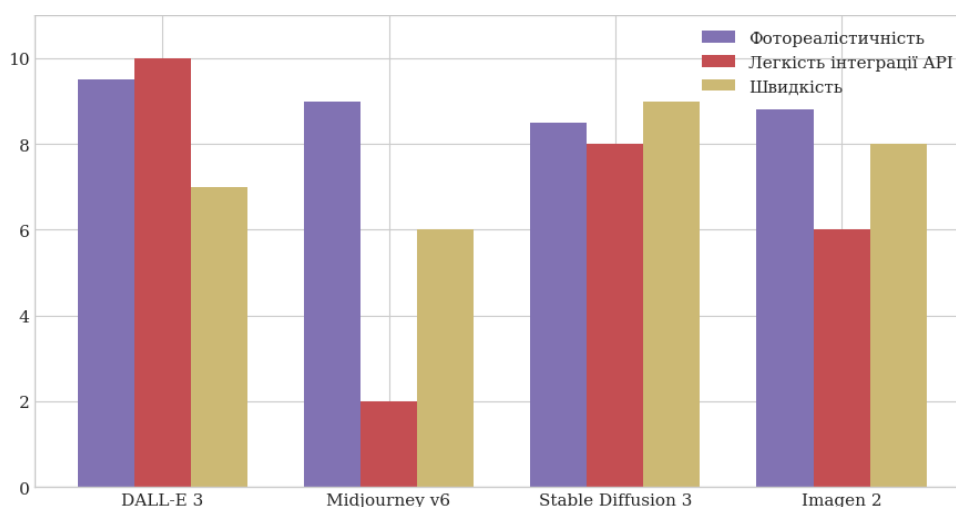


Рис. 3 – Порівняння моделей генерації зображень

На основі матриці «Вартість-Якість» було обрано комбінацію GPT-4 Turbo + DALL-E 3.

Одним із ключових завдань дослідження було визначення впливу інтелектуального планування на бюджет домогосподарств. Апробація проводилася за участі 20 респондентів віку 25–52 роки та різної статі протягом 30-денного періоду.

Встановлено, що використання функції генерації рецептів на основі наявних залишків продуктів дозволяє суттєво оптимізувати витрати. Згідно з отриманими даними, середньомісячні витрати на продукти харчування

до впровадження системи склали 21 976 грн. Після місяця експлуатації додатка «FridgeChief» цей показник знизився до 16 318 грн. Середній відсоток економії склав 25,7%, при цьому 95% учасників експерименту зафіксували позитивну динаміку скорочення витрат.

Аналіз діаграми розмаху (рис. 4) свідчить про суттєве зменшення медіанного значення витрат вниз та зменшення варіативності даних, що підтверджує стабілізацію фінансової поведінки користувачів завдяки предиктивному плануванню покупок.

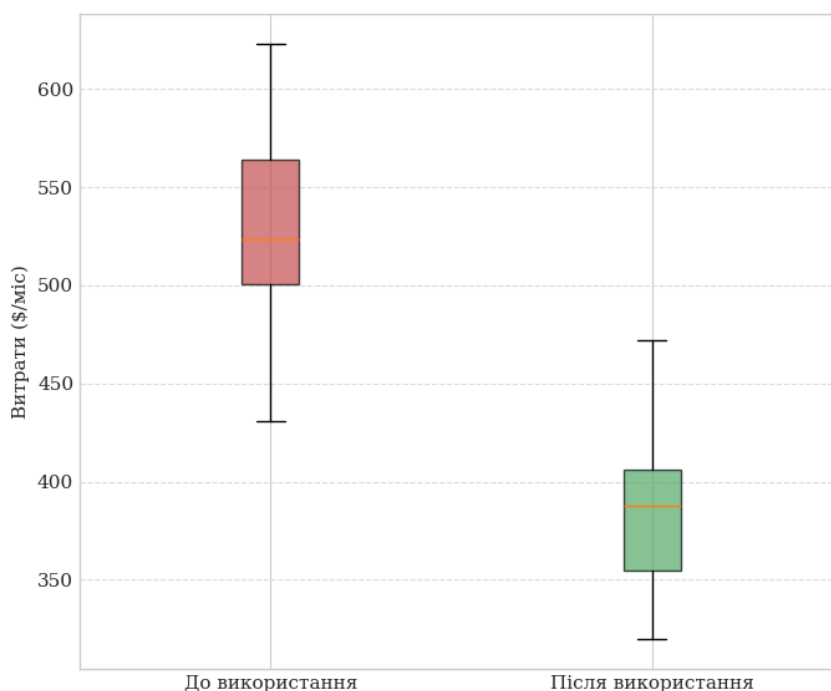


Рис. 4 – Діаграма розмаху щомісячних витрат на продукти

Комплексний аналіз поведінкових метрик респондентів, візуалізований за допомогою пелюсткової діаграми (рис. 5), демонструє суттєву позитивну динаміку в оптимізації споживчих процесів. Найбільш вагомим результатом впровадження системи стало радикальне скорочення обсягу харчових відходів. Середній показник утилізованих продуктів знизився з 26,8% до 9,6% від загального обсягу закупівлі. Відносне скорочення відходів на рівні 64% повністю підтверджує гіпотезу про те, що алгоритмічна генерація кулінарних рішень із наявних інгредієнтів ефективно запобігає їх передчасному псуванню. Інтеграція інтелектуального помічника безпосередньо вплинула на логістику закупівель. Середня частота відвідування продуктових магазинів знизилася з 6,1 до 2,4 рази на тиждень. Користувачі перейшли від стратегії спонтанних щоденних покупок до планового поповнення запасів.

Суб'єктивна оцінка навичок планування меню за 10-бальною шкалою зросла з 3,8 до 8,2 балів. Респонденти відзначили високу релевантність та логічну зв'язність згенерованих рецептів, а також вагому роль візуального супроводу, реалізованого через модель DALL-E 3, що сприяло підвищенню довіри до рекомендацій системи.

Розроблена інтелектуальна система «FridgeChief» демонструє високий рівень адаптивності. Завдяки використанню архітектури REST API, додаток може бути легко масштабований:

- для індивідуальних користувачів – як персональний асистент зі здорового харчування;
- для екологічних ініціатив – як інструмент у межах концепції «Zero Waste»;
- для бізнесу – потенційна інтеграція з сервісами доставки продуктів (автоматичне формування кошика на основі відсутніх інгредієнтів для обраних рецептів).

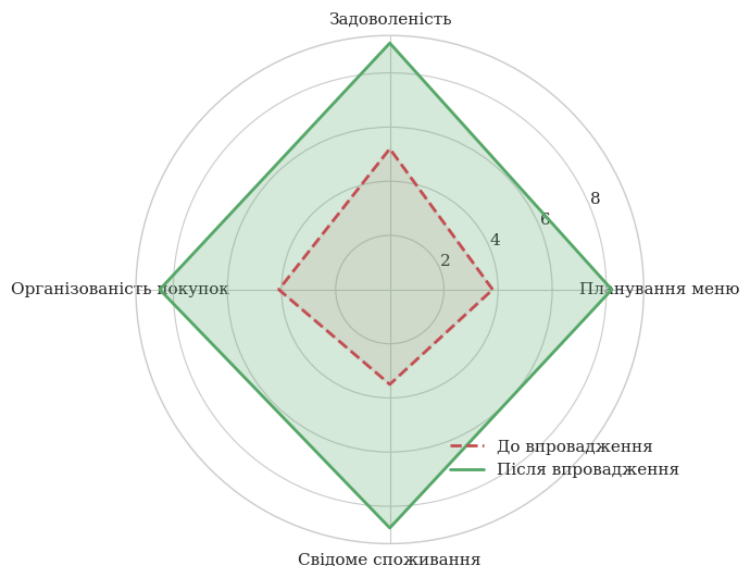


Рис. 5 – Пелюсткова діаграма зміни споживчої поведінки

Висновки

Розроблено багаторівневу архітектуру мобільного додатка «FridgeChief» на базі мови Swift, що забезпечує безшовну взаємодію між локальним рівнем керування даними та хмарними сервісами генеративного штучного інтелекту. Використання сучасних декларативних інструментів SwiftUI дозволило створити адаптивний інтерфейс для динамічного відображення результатів роботи нейромереж.

У ході дослідження встановлено, що застосування моделі GPT-4 Turbo через OpenAI API гарантує найвищий показник логічної зв'язності та кулінарної валідності рецептів, а впровадження моделі DALL-E 3 забезпечує високу семантичну відповідність візуалізації текстовому опису. Це визначено як критичний чинник підвищення довіри користувача до автоматизованих рекомендацій та покращення UX-метрик системи.

Апробація системи протягом 30 днів за участі контрольної групи підтвердила її високу практичну ефективність: зафіксовано перехід користувачів до планової стратегії споживання, що зумовило зниження частоти відвідування магазинів з 6,1 до 2,4 рази на тиждень. Суб'єктивна оцінка якості планування раціону при цьому зросла з 3,8 до 8,2 бала за 10-бальною шкалою.

Експериментально доведено здатність інтелектуального помічника радикально мінімізувати обсяг харчових відходів – середній показник утилізації продуктів знизився з 26,8% до 9,6%. Економічна доцільність рішення підтверджується скороченням середньомісячних витрат на продукти з 21 976 грн до 16 318 грн (економія понад 25%), що свідчить про значну соціальну значущість проекту.

Подальший розвиток системи вбачається в автоматизації інвентаризації через інтеграцію модулів комп'ютерного зору для потокового розпізнавання об'єктів та сканування фіскальних чеків. Це дозволить

суттєво знизити поріг входу для користувача та підвищити точність прогнозних моделей завдяки мінімізації ручного введення даних.

Перелік використаних джерел

- [1] Food recognition using deep learning: A review / B. Liu et al. 2022 4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), Greater Noida, India, 16–17 December 2022. Pp. 1221-1225. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAC3N56670.2022.10074297>.
- [2] Martínez-Pérez B., de la Torre-Díez I., López-Coronado M. Mobile Health Applications for the Most Prevalent Conditions by the World Health Organization: Review and Analysis. *Journal of Medical Internet Research*. 2013. Vol. 15, no. 6. Article e120. DOI: <https://doi.org/10.2196/jmir.2600>.
- [3] Liu J. Q., Boulom T. An AI-Powered Mobile Application for Reducing Food Waste through Cost Estimation and user Awareness. *Proceedings of 6th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*, Chengdu, China, 23-26 May 2025. Pp. 37-45. DOI: <https://doi.org/10.5121/csit.2024.150104>.
- [4] Toh S. H. Y., Lee S. C., Sündermann O. Mobile Behavioral Health Coaching as a Preventive Intervention for Occupational Public Health: Retrospective Longitudinal Study. *JMIR Formative Research*. 2023. Vol. 7. Article e45678. DOI: <https://doi.org/10.2196/45678>.
- [5] Ataguba G., Orji R. Exploring Large Language Models for Personalized Recipe Generation and Weight-Loss Management. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*. 2025. Vol. 6, iss. 2. Article 22. Pp. 1-57. DOI: <https://doi.org/10.1145/3712709>.

- [6] Sherin J., Prasath V. S., Rayen S. J. AI-Driven Recipe Recommendation System and Seamless Ingredient Delivery. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*. 2025. Vol. 7, iss. 1. Article 37792. DOI: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i01.37792>.
- [7] Krupitzer C., Stein A. Food Informatics – Review of the Current State-of-the-Art, Revised Definition, and Classification into the Research Landscape. *Foods*. 2021. Vol. 10, iss. 11. Article 2889. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10112889>.
- [8] NoWaste official website. URL: <https://www.nowasteapp.com> (дата звернення 15.01.2026).
- [9] Kitche official website. URL: <https://www.kitche.co> (дата звернення 15.01.2026).
- [10] SuperCook official website. URL: <https://www.supercook.com> (дата звернення 15.01.2026).
- [11] Yummly official website. URL: <https://www.yummly.com> (дата звернення 15.01.2026).
- [12] ZOE official website. URL: <https://www.zoe.com> (дата звернення 15.01.2026).
- [13] Nutrigenomix official website. URL: <https://www.nutrigenomix.com> (дата звернення 15.01.2026).
- [14] Olio official website. URL: <https://www.olioapp.com> (дата звернення 15.01.2026).
- [15] Too Good To Go official website. URL: <https://www.toogoodtogo.com/> (дата звернення 15.01.2026).

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF MOBILE FOOD RESOURCE MANAGEMENT USING AN INTELLIGENT SYSTEM BASED ON SWIFTUI ARCHITECTURE AND LLM MODELS

- Balalaieva O. Yu.** 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;
- Marchenko I. F.** PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4566-3866>, e-mail: marchenko_i_f@pstu.edu;
- Bratkevych V. P.** M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», e-mail: bratkevych_v_p@students.pstu.edu

The paper presents the results of the development and approbation of the "FridgeChief" mobile intelligent system, designed to automate food resource management in households. The software product is implemented in the Xcode environment using the Swift programming language and SwiftUI and SwiftData frameworks, ensuring native performance and efficient management of local ingredient databases. A key technological feature of the application is its integration with the OpenAI API, which enables the use of GPT-4 Turbo models for dynamic recipe generation and DALL-E 3 for their visualization. The study substantiates the system architecture, which implements seamless interaction between local inventory and cloud-based LLM models. The application's functionality provides a detailed analysis of available products while considering a wide matrix of dietary restrictions: vegan, vegetarian, gluten-free, lactose-free, paleo, keto, and low-carb diets. Generated recommendations include the dish name, cooking time, difficulty level, a list of components, and step-by-step instructions. A mechanism for saving recipes on the device and a variability algorithm have been implemented to exclude dish duplication when using identical sets of ingredients. Experimental verification over a 30-day period confirmed the high efficiency of the chosen technological stack. The implementation of the system allowed for a reduction in food waste by 64 %, while the overall rate of food disposal decreased from 26.8 % to 9.6 %. An optimization of users' food expenses by 25.7 % was recorded. Behavioral analysis showed a 2.5-fold decrease in the frequency of unplanned grocery purchases, while the subjective assessment of meal planning quality increased by 2.2 times. It has been proven that the use of generative AI in native mobile interfaces is an effective tool for implementing the "zero-waste" concept through precise personalization and minimization of time spent on meal planning.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, mobile application, generative models, meal planning, food resource management, waste minimization, Swift, OpenAI API, zero-waste.

References

- [1] B. Liu, J. Gu, L. Fu, J. Zhou, X. Cheng, and L. Chen, "Food recognition using deep learning: A review," in 2022 4th Int. Conf. on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), Greater Noida, India, December 16–17, 2022, pp. 1221-1225. doi: [10.1109/ICAC3N56670.2022.10074297](https://doi.org/10.1109/ICAC3N56670.2022.10074297).
- [2] B. Martínez-Pérez, I. de la Torre-Díez, and M. López-Coronado, "Mobile Health Applications for the Most Prevalent Conditions by the World Health

- Organization: Review and Analysis,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 15, no. 6, article e120, 2013. doi: 10.2196/jmir.2600.
- [3] J. Q. Liu, and T. Boulom, “An AI-Powered Mobile Application for Reducing Food Waste through Cost Estimation and user Awareness,” in *Proc. of 6th Int. Conf. on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*, Chengdu, China, May 23-26, 2025, pp. 37-45. doi: 10.5121/csit.2024.150104.
- [4] S. H. Y. Toh, S. C. Lee, and O. Sündermann, “Mobile Behavioral Health Coaching as a Preventive Intervention for Occupational Public Health: Retrospective Longitudinal Study,” *JMIR Formative Research*, vol. 7, article e45678, 2023. doi: <https://doi.org/10.2196/45678>.
- [5] G. Ataguba, and R. Orji, “Exploring Large Language Models for Personalized Recipe Generation and Weight-Loss Management,” *ACM Transactions on Computing for Healthcare*, vol. 6, iss. 2, article 22, pp. 1-57, 2025. doi: 10.1145/3712709.
- [6] J. Sherin, V. S. Prasath, and S. J. Rayen, “AI-Driven Recipe Recommendation System and Seamless Ingredient Delivery,” *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, vol. 7, iss. 1, article 37792, 2025. doi: 10.36948/ijfmr.2025.v07i01.37792.
- [7] C. Krupitzer, and A. Stein, “Food Informatics – Review of the Current State-of-the-Art, Revised Definition, and Classification into the Research Landscape,” *Foods*, vol. 10, iss. 11, article 2889, 2021. doi: 10.3390/foods10112889.
- [8] NoWaste official website. [Online]. Available: <https://www.nowasteapp.com>. Accessed on: January 15, 2026.
- [9] Kitche official website. [Online]. Available: <https://www.kitche.co>. Accessed on: January 15, 2026.
- [10] SuperCook official website. [Online]. Available: <https://www.supercook.com>. Accessed on: January 15, 2026.
- [11] Yummly official website. [Online]. Available: <https://www.yummly.com>. Accessed on: January 15, 2026.
- [12] ZOE official website. [Online]. Available: <https://www.zoe.com>. Accessed on: January 15, 2026.
- [13] Nutrigenomix official website. [Online]. Available: <https://www.nutrigenomix.com>. Accessed on: January 15, 2026.
- [14] Olio official website. [Online]. Available: <https://www.olioapp.com>. Accessed on: January 15, 2026.
- [15] Too Good To Go official website. [Online]. Available: <https://www.toogoodtogo.com/>. Accessed on: January 15, 2026.

Стаття надійшла 19.01.2026
Стаття прийнята 21.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Балалаєва О. Ю., Марченко І. Ф., Браткевич В. П. Дослідження ефективності мобільного керування харчовими ресурсами з використанням інтелектуальної системи на базі архітектури SWIFTUI та моделей LLM. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359758>.

APPLICATION OF AI-BASED FORECASTING ALGORITHMS TO IMPROVE THE
RELIABILITY OF SOLAR DIVERTERS**Prokopenko R.**associate professor, Zaporizhzhya Institute of Economics and Information Technologies, Zaporizhzhya, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5872-8570>, e-mail: r.prokopenko@econom.zp.ua;**Poluektova N.**D.Sc. (Economic Sciences), associate professor, Zaporizhzhya Institute of Economics and Information Technologies, Zaporizhzhya, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9637-4916>, e-mail: n.poluektova@econom.zp.ua

This paper presents an adaptive control approach for solar diverters based on artificial intelligence, implemented on the STM32F405 microcontroller platform. The proposed solution addresses the problem of inefficient utilization of surplus photovoltaic (PV) energy in household solar power systems without battery storage, where excess generation is often exported to the grid instead of being locally consumed. The developed approach relies on short-term power forecasting to proactively regulate the operation of a triac-based power controller. A hybrid control strategy is introduced, combining conventional phase-angle control and pulse-width modulation techniques with AI-driven prediction. Based on the forecasted power dynamics, the system selects the most appropriate switching strategy and limits the rate of power change, thereby reducing switching losses and thermal stress on power electronic components. The embedded neural model performs two tasks simultaneously: regression for predicting the magnitude of short-term active power variations and binary classification for determining the direction of energy flow (consumption or export). The model is trained using real measurement data obtained from voltage, current, and phase signals, which are processed into feature vectors describing the real-time electrical state of the system. To ensure compatibility with resource-constrained hardware, the model is optimized for memory usage and execution speed using a TinyML approach. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves a mean absolute error of 18–23 percent and a root mean square error of 16–21 percent in power variation forecasting, while the classification accuracy of energy flow direction reaches 78–84 percent. These results confirm that AI-based predictive control significantly improves the reliability and lifespan of triac-based solar diverters, enables smoother power regulation, and enhances the overall efficiency of solar energy utilization in household photovoltaic installations without reliance on cloud computing.

Keywords: artificial intelligence; embedded neural networks; Keras; photovoltaic systems; power electronics reliability; predictive control; solar diverter; STM32.

Statement of the problem

In household photovoltaic systems without energy storage, solar panels often generate more electricity during the day than household appliances consume. The excess energy is automatically exported to the public electricity grid, which prevents full utilization of the generated power by the owner.

To avoid such losses and maximize the use of generated energy for local consumption or storage, solar diverters are employed. Their purpose is to «capture» the surplus energy before it is exported to the grid and redirect it to useful local storage loads within the household. By doing so, a solar diverter increases the share of self-consumption, reduces electricity bills, and improves the overall efficiency of solar panels by storing energy in another physical form, such as heating water.

Technically, a solar diverter acts as a power regulator. It monitors the household's energy balance, and when energy export to the grid is detected, it redirects all or part of this flow to local loads. This is typically achieved through a controlled power switch (such as a triac), which allows smooth regulation of the delivered power.

However, under real operating conditions, household loads and solar generation fluctuate irregularly, leading to:

- abrupt changes when appliances switch on or off;

- gradual variations caused by cloud cover or precipitation affecting solar panel output;

- thermal and electrical stress on power electronic components resulting from sudden power surges.

Under simple phase-angle control, such variations increase the load on the triac, causing overheating, accelerated crystal degradation, and reduced device lifetime. To mitigate these effects, conventional methods are typically applied:

- half-cycle control (burst control);
- software filters for power variation rate;
- protection of the power circuit using snubbers and varistors.

However, all these methods are reactive, meaning that the system responds only after a power surge occurs. Therefore, the current challenge is the developing proactive methods for regulating the distribution of generated solar energy. This paper proposes an algorithm that, using artificial intelligence, enables the prediction of power dynamics in advance and selects the optimal method for triac control.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Although net metering systems allow owners to earn revenue from exported electricity, this approach does not ensure full utilization of solar energy and may lead to economic and energy losses. Recent studies have focused on strategies to optimize the use of generated solar energy, including the deployment of solar diverters, energy storage systems, and intelligent load management.

Solar diverters automatically redirect excess energy from photovoltaic systems to internal consumers, such as water heaters, heating systems, or other appliances, thereby increasing self-consumption and reducing reliance on the electricity grid [1]. Energy storage technologies, including batteries and thermal storage, enable temporary shifting of solar energy use, addressing the mismatch between production and consumption [2].

The integration of solar energy into the grid also introduces technical challenges, such as voltage fluctuations, bidirectional power flow, and distribution line overloads [3]. To balance the distribution of solar energy between grid export, storage, and local consumption, optimization algorithms—including genetic algorithms and multi-objective strategies—are applied [4, 5].

Some studies emphasize the need to combine technological solutions, intelligent control strategies, and regulatory mechanisms to improve the efficiency of solar energy distribution. For instance, [6] presents an optimization approach based on a Multiple Mitosis Genetic Algorithm (MMGA) to select the most suitable line capable of accepting excess power from an overloaded feeder.

In [7], Deep Reinforcement Learning approaches are used to balance the distribution of photovoltaic generation between batteries and the grid, while [8] proposes a machine learning model to optimize battery utilization in photovoltaic systems.

Recent trends in embedded artificial intelligence systems involve the use of Tiny Machine Learning (TinyML), which allows the deployment of machine learning models on resource-constrained devices, such as microcontrollers, sensors, and other edge systems [9]. Such models operate without cloud connectivity, performing computations directly on the device with minimal memory usage and energy consumption. The study in [10] comprehensively investigates the application of TinyML models for forecasting solar irradiance and photovoltaic power, considering different model types, input features, prediction horizons, peripheral devices, optimization methods, and practical deployment aspects. In [11], a photovoltaic monitoring system is presented for detecting anomalies and damages using thermal images, employing a TinyML and Edge Computing approach for on-device analysis without transmitting large amounts of data to the cloud.

Overall, research on modern artificial intelligence technologies, including TinyML, for improving the efficiency of automatic control and regulation of solar generation systems demonstrates high potential for optimizing

energy processes, reducing losses, and increasing the effectiveness of energy systems.

Purpose and task statement

The study aims to develop and validate an adaptive AI-based control method for solar diverters that enables short-term power forecasting and optimal triac switching strategy selection in order to improve the reliability, efficiency, and operational lifetime of power electronic components in household photovoltaic systems without energy storage.

Summary of the main material

A Solution Architecture

The proposed algorithm enables the prediction of short-term power dynamics and the selection of the optimal triac control method for upcoming time steps. This approach enhances power electronics reliability, extends component lifespan, and maximizes the effective use of solar energy for household consumption.

The main idea of the approach is to combine traditional triac control methods with artificial intelligence-based analysis and forecasting capabilities. This hybrid principle allows the system to prepare in advance for changes in operating conditions, thereby reducing stress on power components. The solution architecture is proposed as a two-level system (Fig. 1).

The executive controller (STM32F405) manages the BTA40-800B triac. Analog inputs of the executive controller receive voltage and current signals from sensors (0–240 V, 0–30 A, scaled to the 0–3.3 V range). It also receives a zero-crossing signal, which is required to generate control signals for the triac using a driver (e.g., MOC3023). This ensures precise and synchronized load switching.

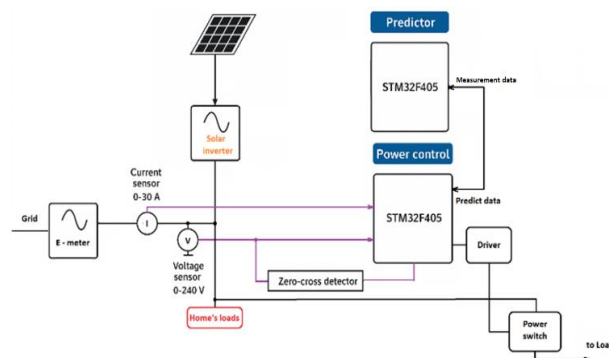


Fig. 1 – Structural diagram of the power and measurement sections of the solar diverter (authorship: this work, based [12])

The controller supports various operating modes:

- Phase-angle control – power regulation under significant load variations;
- Burst control (half-cycle PWM) – switching whole half-cycles on/off during moderate load fluctuations or under stable conditions;

• PWM with rate-of-change limitation – applied during abrupt power changes to adapt quickly without causing thermal or electrical stress on the triac.

The executive microcontroller calculates voltage, current, power, power direction, and power factor, and sends these data to the advisory microcontroller. The advisor analyzes system dynamics using an AI model to forecast system behavior. The AI can classify load conditions as stable, moderately fluctuating, frequently changing, or experiencing sudden power surges.

The advisor's output is a recommendation on which control mode the executive microcontroller should apply and the allowable rate of power change in upcoming half-cycles for PWM operation.

Let us consider the advisor operation in more detail. It predicts the power change dP , its direction, and the energy flow mode (import or export), denoted as sign. The obtained predictions are transmitted to a processing algorithm that makes a logical selection of the control method. Specifically, depending on the magnitude and sign of dP (for example, if the power change exceeds a threshold, is negative, or falls within a certain range), the algorithm automatically selects the appropriate triac regulation mode. This approach combines intelligent forecasting of the power system state with deterministic control, ensuring adaptability and system stability under varying load and generation conditions.

At the next step, data are sent to the executive controller via the I²C interface in the form of a simple packet (e.g., mode: «phase-angle» 0b00000001, mode: «PWM» without rate limitation 0b00000010, mode: «PWM» with rate limitation 0b10000010, etc.).

Thus, the executive controller remains fully separated from the AI and reliable, while artificial intelligence performs only an advisory function, reducing the likelihood of abrupt transitions and increasing the lifespan of the power electronics. The main benefit of integrating a Keras-based forecasting module reduces thermal and electrical stress on the triac, thereby increasing its service life and the overall system reliability.

At the same time, smoother power regulation is achieved along with reduced harmonic distortion in the grid. Each triac switching event involves transient processes accompanied by energy dissipation (1).

$$Q_{sw} = \int_0^{t_{on}} V(t) \cdot I(t) dt. \quad (1)$$

During abrupt changes of the triac conduction angle or full switching on/off of a high-power load, the switching energy Q_{sw} increases sharply. The accumulated thermal load is calculated as:

$$P_{loss} = f_{sw} * Q_{sw}, \quad (2)$$

where f_{sw} is the switching frequency.

Forecasting the load dynamics allows reducing both the switching energy and the switching frequency, thereby decreasing the thermal power P_{loss} .

We introduce the power change rate as:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{k+1} - P_k}{\Delta t}, \quad (3)$$

where:

P_k – power in the current half-period,

P_{k+1} – power in the next half-period,

Δt – duration of the half-period.

If the rate of power change dP/dt is high, the triac must rapidly adjust its firing angle, which imposes stress on the semiconductor. AI-based forecasting allows estimating both the sign and magnitude of dP/dt in advance and "smooths" the transition over several half-periods. This approach increases the triac's lifespan by reducing the integral of thermal losses (4):

$$\Delta P_{loss} = P_{loss}^{classic} - P_{loss}^{predictive} > 0, \quad (4)$$

and the system reliability grows exponentially, as the lifetime of semiconductor devices generally follows the Arrhenius model:

$$L \sim \frac{E_a}{kT}, \quad (5)$$

where even a few degrees reduction in semiconductor junction temperature can significantly multiply the device lifetime.

Using AI as an «advisor» enables the system to:

- reduce peak thermal stress on the triac,
- multiply its operational lifetime,

improve regulation quality (lower harmonic distortion), maximize the utilization of excess solar energy.

B Formation of Input Data for the Model

To train a Keras-based AI model, a dataset representing the system's current electrical state must be formed. These parameters are used by the AI algorithm to forecast the active power change in the next step, specifically its increment (dP) and the energy flow direction (sign), which indicates whether energy is being consumed or exported.

Voltage and current signals are measured by the STM32F405 microcontroller at a sampling interval of 0.2 seconds for a 50 Hz network. For a single analysis cycle, 400 samples are collected, providing statistically reliable values of the effective parameters.

Within a single cycle, the following sequence of operations is performed.

Digitization of voltage (V_{sample}) and current (I_{sample}) signals through the analog inputs of the microcontroller.

1. Filtering of the DC component using a digital filter that updates DC (Direct Current) offset value: according to (6):

$$Data_{offset\ n+1} = Data_{offset\ n} + \frac{Data_{sample} - Data_{offset\ n}}{ADC\ resolution}, \quad (6)$$

where:

$Data_{offset\ n+1}$ – updated DC offset value;

$Data_{offset\ n}$ – previous DC offset value;

$Data_{sample}$ – current measured signal sample;

ADC resolution – analog-to-digital converter resolution (e.g., 4096 for a 12-bit ADC).

2. Obtaining the AC component centered around zero:

$$Data_{filtered} = Data_{sample} - Data_{offset\ n}. \quad (7)$$

3. Calculation of instantaneous power::

$$P = V_{filtered} \cdot I_{filtered}. \quad (8)$$

After accumulating 400 samples, integration calculations are performed to determine the values of voltage, current, and power, as well as the power factor (PowerFactor).

The calculations are performed according to formulas (9–12):

$$Data_{rms} = K \cdot \sqrt{\frac{\sum Data_{filtered}^2}{N}}, \quad (9)$$

where: K – calibration coefficient, N – number of samples

$$P_{real} = K_V \cdot K_I \cdot \frac{\sum P}{N}, \quad (10)$$

$$P_{apparent} = V_{rms} \cdot I_{rms}, \quad (11)$$

$$PowerFactor = \frac{P}{P_{apparent}}. \quad (12)$$

Because the machine learning model must reflect dynamics of power changes, only those parameters that are directly measured by the executive microcontroller and transmitted via I²C are fed as input:

$$X(t) = [V_{rms}(t), I_{rms}(t), P(t), P_{apparent}(t), PowerFactor(t)]. \quad (13)$$

The goal of the model is to predict the power state at the next time step:

$$Y(t)_m = [dP_{m+1}, sign_{m+1}], \quad (14)$$

where:

dP_{m+1} – predicted power change,

$sign_{m+1}$ – energy flow direction (consumption/export).

Using the forecast data obtained in the format (14), the "advisor" makes decisions on which control mode to use. For example, if the predicted change dP does not exceed 300 W, it is recommended to apply the PWM mode without speed limitations.

The executive microcontroller receives the data on the control method type and other service information every 0.2 seconds via the I²C interface.

C Creation of the AI Model

The goal of this stage was to develop and implement a compact regression neural model capable of predicting changes in active power in the time series of electrical signals. The model is based on measurements obtained from the executive microcontroller, which in turn receives data from voltage and current sensors for further processing. The primary task of the model is to determine the direction of power change – whether it will increase or decrease at the next time step – which is critical for selecting the triac control functions.

To train the model, sequences of input vectors (13) describing the temporal dynamics of the parameters are used. To capture temporal dependence, a sliding window of the six most recent measurements was used, covering a time interval of approximately 1.2 seconds. Thus, to produce the first forecast, the system must accumulate at least six consecutive data cycles. During this period, the model is inactive – the microcontroller only collects valid data in the buffer, ensuring filter stabilization and offset compensation. Full operation of the forecasting system begins 1.2–3 seconds after startup.

This approach ensures forecast stability and eliminates false results during the transient period. After the buffer is filled, the model performs the first prediction of the future power state, according to (14).

Considering the computational limitations of the STM32F405, the model is built with a simplified architecture without redundant layers, ensuring high execution speed and low energy consumption.

The neural network is trained using a combined loss function:

$$L = \alpha \cdot MSE(dP_{pred}, dP_{true}) + \beta \cdot BCE(sign_{pred}, sign_{true}), \quad (15)$$

where the first term minimizes the regression error, and the second improves the accuracy of predicting the power flow direction, allowing simultaneous minimization of the regression error and enhancement of directional classification accuracy.

Mean Squared Error (MSE) penalizes large deviations, training the model to accurately predict the magnitude of power change, and is defined as:

$$MSE(dP_{pred}, dP_{true}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (dP_{pred}^{(i)} - dP_{true}^{(i)})^2, \quad (16)$$

BCE (Binary Cross-Entropy) – binary cross-entropy is calculated as:

$$BCE(sign_{pred}, sign_{true}) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [sign_{true}^{(i)} \log(sign_{pred}^{(i)}) + (1 - sign_{true}^{(i)}) \log(1 - sign_{pred}^{(i)})], \quad (17)$$

where:

$sign_{pred}$ – predicted power direction,

$sign_{true}$ – actual power direction.

The coefficients $\alpha = 0.83$ and $\beta = 0.33$ in the combined loss function were determined empirically to balance the regression (MSE) and classification (BCE) contributions. This combination ensures computational simplicity, high prediction accuracy, and efficient implementation on the STM32F405. Unlike alternative loss functions, it provides stable, fast, and accurate real-time forecasting, with training performed on data covering both stable and abrupt variations in voltage and load.

Figure 3 shows the architecture of the two-output regression-classification neural network for predicting power change and its direction.

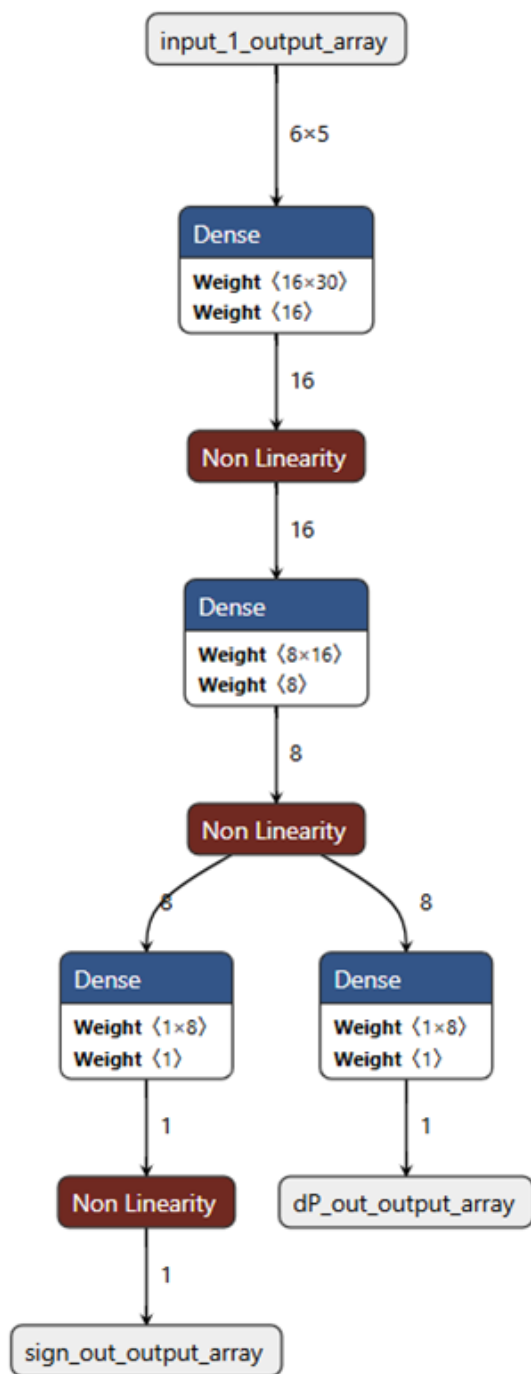


Fig. 3 – Architecture of the two-output regression–classification neural network for predicting power change and its direction (authorship: this work)

Thus, the model learns to respond flexibly to non-stationary processes typical of household loads.

Results and Discussion

The test results indicate that forecast quality is sufficient. The model reproduces power trends during transient conditions and determines the direction of energy flow.

Table 1

Main experimental metrics	
Metric	Value
Mean Absolute Error (for ΔP)	18–23 % of the nominal power
RMSE	16–21 %
Classification accuracy of $\text{sign}_{\text{next}}$	78–84 %

The model achieves an average prediction error (MAE) of 18–23% of the nominal power, and an RMSE of 16–21%, indicating stable reproduction of power trends during transient conditions. The energy flow direction classification accuracy ($\text{sign}_{\text{next}}$ feature) is 78–84%, which is an acceptable level for real-time systems without hardware acceleration for neural computations.

Optimization reduced memory use from ~36 kB to 12.5 kB and prediction time to 4.6 ms (in int16 format) demonstrating successful real-time adaptation, including triac control tasks.

The model was optimized, reducing memory usage from approximately 36 kB to about 12.5 kB. The execution time for a single prediction at a clock frequency of 168 MHz is presented in Table 2.

Table 2

Model performance indicators	
Format	Execution time of a single prediction
float32	≈ 18.9 mc
float16	≈ 12.1 mc
Int16	≈ 4.6 mc

It is especially important that the model can adequately respond to short-term load variations without losing prediction stability.

Conclusions

This work presents the process of developing and implementing a compact neural network model for forecasting active power variations on the STM32F405 microcontroller.

Previous approaches to power forecasting in embedded systems were typically based on simplified linear models or filtering algorithms that did not account for temporal dependencies between successive measurements.

The proposed AI model, in contrast, leverages temporal context (sliding window) and combines regression and classification outputs, improving the system's accuracy and adaptability.

Compared to models deployed on more powerful platforms (e.g., Raspberry Pi or ESP32), the implementation on the STM32F405 demonstrates comparable accuracy with significantly lower power consumption and computational latency.

The developed model:

- generates predictions of both the magnitude and direction of power changes based on five key electrical parameters;
- demonstrates acceptable accuracy for local load control;
- operates without the need for hardware acceleration
- has a small memory footprint (≈ 12.5 kB) and a short prediction execution time (< 5 ms).

The main contribution of this work is demonstrating the feasibility of effectively applying AI approaches on mid-range microcontrollers for energy monitoring and control tasks.

Future research will focus on implementing an adaptive self-learning mechanism during operation and integrating multiple microcontrollers into a network for distributed forecasting.

References

- [1] V. H. Udoka, R. Kiiza, K. J. Ukagwu, and W. Okafor, "Factors influencing the efficiency of solar energy systems," *Journal of Engineering, Technology & Applied Science*, vol. 6, no. 3, pp. 119-131, 2024. doi: [10.36079/lamintang.jetas-0603.748](https://doi.org/10.36079/lamintang.jetas-0603.748).
- [2] O. F. Eikeland et al., "Power availability of PV plus thermal batteries in real-world electric power grids," 2023, arXiv:2302.01902. doi: [10.48550/arXiv.2302.01902](https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01902).
- [3] Z. Sandi, "Examining power quality challenges in photovoltaic-grid integration: A critical review," *Journal of Power Energy and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 12-23, 2024. doi: [10.62777/pec.v1i1.4](https://doi.org/10.62777/pec.v1i1.4)
- [4] K. Lalbiakhlua, S. Deb, Ksh. R. Singh, S. Datta, H. A. Shuaibu, and T. S. Ustun, "Deep learning based solar forecasting for optimal PV BESS sizing in ultra fast charging stations," *Scientific Reports*, vol. 15, article 32392, 2025. doi: [10.1038/s41598-025-17408-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-17408-0).
- [5] H. Qi, X. Yan, Y. Kang, Z. Yang, S. Ma, and Y. Mi, "Multi-objective optimization strategy for the distribution network with distributed photovoltaic and energy storage," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 2024. doi: [10.3389/fenrg.2024.1418893](https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1418893).
- [6] K. Kamil, K. H. Chong, and H. Hashim, "Excess power rerouting in the grid system during high penetration solar photovoltaic," *Electric Power Systems Research*, vol. 214, part A, 2023. doi: [10.1016/j.epsr.2022.108871](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108871).
- [7] L. Yu et al., "Deep reinforcement learning for smart home energy management," *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1-12, 2019. doi: [10.1109/JIOT.2019.2957289](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2957289).
- [8] A. C. Real, G. P. Luz, J. M. C. Sousa, M. C. Brito, and S. M. Vieira, "Optimization of a photovoltaic-battery system using deep reinforcement learning and load forecasting," *Energy and AI*, vol. 16, article 100347, May 2024. doi: [10.1016/j.egyai.2024.100347](https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100347).
- [9] D. Situnayake, and P. Warden, *TinyML: Machine Learning with TensorFlow on Arduino and Ultra-Low Power Micro-Controllers*, 1st ed., Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2020.
- [10] N. El-Amarty, C. Chekira, H. El Fadili, and S. D. Ben-nani, "Solar energy forecasting using TinyML techniques: A comprehensive survey," in *Proc. 4th Int. Conf. Advances in Communication Technology and Computer Engineering (ICACTCE-24)*, Marrakech, Morocco, 29–30 November 2024, pp. 376-387. doi: [10.1007/978-3-031-94623-3_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-94623-3_33).
- [11] A. D. Suarez-Gomez, and J. O. Bareno Quintero, "Integrated thermal monitoring system for solar PV panels: An approach based on TinyML and edge computing," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 3795, pp. 14-27, 2024.
- [12] B. Malone and J. Kelly, "Generated electricity diverter," GB Patent 2498352, July 17, 2013.

ЗАСТОСУВАННЯ ШІ АЛГОРИТМІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СОНЯЧНИХ ДИВЕРТОРІВ

Прокопенко Р.В.	доцент, Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій, м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5872-8570 , e-mail: r.prokopenko@econom.zp.ua ;
Полуктова Н.Р.	д-р екон. наук, доцент, Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій, м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9637-4916 , e-mail: n.polukтова@econom.zp.ua

У роботі представлено адаптивний підхід до керування сонячними диверторами на основі штучного інтелекту, реалізований на платформі мікроконтролера STM32F405. Запропоноване рішення спрямоване на розв'язання проблеми неефективного використання надлишкової фотоелектричної (PV) енергії в побутових сонячних електростанціях без акумуляторних накопичувачів, коли надлишок генерації часто експортується до електромережі замість локального споживання. Розроблений підхід базується на короткостроковому прогнозуванні потужності для проактивного регулювання роботи силового контролера на основі симістора. Запропоновано гібридну стратегію керування, яка поєднує традиційне фазо-кутове керування та методи широтно-імпульсної

модуляції з прогнозуванням на основі штучного інтелекту. З урахуванням прогнозованої динаміки потужності система обирає оптимальну стратегію комутації та обмежує швидкість зміни потужності, що дозволяє зменшити втрати на перемикання та теплові навантаження на силові електронні компоненти. Вбудована нейронна модель одночасно виконує дві задачі: регресію для прогнозування величини короткострокових змін активної потужності та бінарну класифікацію для визначення напрямку потоку енергії (споживання або експорт). Навчання моделі здійснюється на основі реальних вимірювальних даних напруги, струму та фазових сигналів, які формують вектори ознак, що описують поточний електричний стан системи. Для забезпечення сумісності з апаратними платформами з обмеженими ресурсами модель оптимізовано за обсягом пам'яті та швидкодією з використанням підходу TinyML. Експериментальні результати показують, що запропонована система досягає середньої абсолютної похибки 18–23 % та середньоквадратичної похибки 16–21 % при прогнозуванні змін потужності, а точність класифікації напрямку потоку енергії становить 78–84 %. Отримані результати підтверджують, що прогнозне керування на основі штучного інтелекту суттєво підвищує надійність і ресурс симісторних сонячних диверторів, забезпечує більш плавне регулювання потужності та підвищує загальну ефективність використання сонячної енергії в побутових фотоелектричних установках без використання хмарних обчислень.

Ключові слова: штучний інтелект; вбудовані нейронні мережі; Keras; фотоелектричні системи; надійність силових електроніки; прогнозне керування; сонячний дивертор; STM32.

Перелік використаних джерел

- [1] Factors influencing the efficiency of solar energy systems / Udoka V. H., Kiiza R., Ukagwu K. J., Okafor W. *Journal of Engineering, Technology & Applied Science*. 2024. Vol. 6, no. 3. Pp. 119-131. DOI: <https://doi.org/10.36079/lamintang.jetas-0603.748>.
- [2] Power availability of PV plus thermal batteries in real-world electric power grids / O. F. Eikeland et al. *arXiv preprint*. arXiv:2302.01902. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01902>.
- [3] Sandi Z. Examining power quality challenges in photovoltaic-grid integration: A critical review. *Journal of Power Energy and Control*. 2024. Vol. 1, no. 1. Pp. 12-23. DOI: <https://doi.org/10.62777/pec.v1i1.4>.
- [4] Deep learning based solar forecasting for optimal PV BESS sizing in ultra fast charging stations / K. Lalbiakhlu et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 32392. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17408-0>.
- [5] Multi-objective optimization strategy for the distribution network with distributed photovoltaic and energy storage / H. Qi et al. *Frontiers in Energy Research*. 2024. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1418893>.
- [6] Kamil K., Chong K. H., Hashim H. Excess power rerouting in the grid system during high penetration solar photovoltaic. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 214, part A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108871>.
- [7] Deep reinforcement learning for smart home energy management / L. Yu et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2957289>.
- [8] Optimization of a photovoltaic-battery system using deep reinforcement learning and load forecasting / A. C. Real et al. *Energy and AI*. 2024. Vol. 16. Article 100347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100347>.
- [9] Situnayake D., Warden P. *TinyML: Machine Learning with TensorFlow on Arduino and Ultra-Low Power Micro-Controllers*. 1st ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2020. 131 p.
- [10] Solar energy forecasting using TinyML techniques: A comprehensive survey / El-Amarty N., Chekira C., El Fadili H., Bennani S. D. *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Communication Technology and Computer Engineering (ICTACE '24)*, Marrakech, Morocco, 29–30 November 2024. Pp. 376-387. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-94623-3_33.
- [11] Suarez-Gomez A. D., Bareno Quintero J. O. Integrated thermal monitoring system for solar PV panels: An approach based on TinyML and edge computing. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3795. Pp. 14-27.
- [12] Generated Electricity Diverter: pat. 25742 GB: H02J3/381. № GB1200364.6A; appl. 01.11.12; publ. 17.07.13. 9 p.

Стаття надійшла 21.01.2026

Стаття прийнята 19.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Prokopenko R., Poluektova N. Application of AI-based forecasting algorithms to improve the reliability of solar diverters. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359759>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ХМАРНООРІЄНТОВАНОЇ ВЕБСИСТЕМИ НА ОСНОВІ СТЕКУ MERN ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ АВТОТРАНСПОРТУ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

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

Тригуб В.П. магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: tryhub_v_p@students.pstu.edu

У роботі наведено результати комплексної розробки та апробації хмарноорієнтованого вебсервісу, призначеного для автоматизованого аудиту та предиктивного прогнозування технічного стану автопарку. Програмний продукт реалізовано на основі сучасного технологічного стеку MERN (MongoDB, Express.js, React, Node.js), що забезпечує високу швидкість обробки великих масивів даних та можливість розгортання в ізольованих локальних мережах підрозділів. Ключовою технологічною особливістю системи є інтеграція паливного моніторингу з імовірнісними моделями теорії надійності. В ході дослідження обґрунтовано та впроваджено модифікований алгоритм на основі розподілу Вейбулла-Гнеденка, де параметр масштабу (ресурс) динамічно коригується залежно від індикатора паливної аномалії із застосуванням функції гіперболічного тангенса для нормалізації відхилень. Функціонал сервісу забезпечує повну автоматизацію валідації маршрутних листів, розрахунок нормативних витрат пального з урахуванням складної матриці коригуючих коефіцієнтів та візуалізацію кривих надійності для кожної одиниці техніки в режимі реального часу. Реалізовано інтелектуальний механізм раннього сповіщення про потенційні несправності двигуна та трансмісії на основі виявлених девіацій енергоефективності. Експериментальна верифікація підтвердила високу працездатність обраного архітектурного рішення та стабільність бази даних MongoDB при роботі з неструктурованими логами. Впровадження системи дозволило скоротити час на обробку та перевірку експлуатаційної документації у 7,5 разів. За результатами тестування зафіксовано зростання коефіцієнта технічної готовності (КТГ) парку на 12% та зниження частоти раптових відмов на 18%. Доведено, що використання модифікованих імовірнісних моделей у вебпанелях моніторингу є ефективним інструментом переходу від застарілої планової системи обслуговування до прогресивної стратегії ремонту за фактичним технічним станом. Це дозволяє ідентифікувати деградацію ключових вузлів за 1200–1500 км до моменту їх фактичної відмови, забезпечуючи суттєву економію ресурсів та підвищення боєздатності транспортних підрозділів.

Ключові слова: предиктивна діагностика; технічний стан автотранспорту; енергоефективність; витрати пального; розподіл Вейбулла; теорія надійності; хмарноорієнтовані системи; стек MERN; MongoDB; коефіцієнт технічної готовності; автоматизація аудиту; вебсервіс.

Постановка проблеми

Сучасні медичні заклади все більше залежать від Експлуатація великих автотранспортних парків, зокрема в підрозділах тактичної ланки, вимагає особливої уваги до питань енергоефективності та забезпечення стабільно високого коефіцієнта технічної готовності (КТГ). За даними аналізу предметної області, витрати на пально-мастильні матеріали (ПММ) та технічне обслуговування складають найбільшу частку експлуатаційних витрат підприємств. Неефективне використання пального не лише спричиняє значні фінансові збитки, а й безпосередньо впливає на надійність техніки, оскільки систематичне відхилення фактичного споживання пального від нормативного часто є раннім індикатором прихованих несправностей двигуна або ходової частини.

Однією з ключових причин низької ефективності управління автопарком на рівні кінцевого підрозділу є відсутність автономних та інтелектуальних інструментів моніторингу в режимі реального часу. Традиційні методи контролю, такі як паперові маршрутні листи

або локальні таблиці Excel, характеризуються високим ризиком людського фактора, фрагментарністю даних та неможливістю оперативного прогнозування відмов. Існуючі комерційні GPS-системи та складні ERP-рішення часто є неприйнятними для використання в польових умовах через ризики інформаційної безпеки, залежність від глобальної мережі та надмірну складність налаштування.

Актуальним завданням є розробка автономного хмарноорієнтованого вебсервісу на основі стеку MERN, де автоматизація обліку пального та маршрутів інтегрована з інструментами предиктивної діагностики технічного стану. Створення такої системи, що використовує імовірнісні моделі (зокрема розподіл Вейбулла) для виявлення кореляції між паливною ефективністю та надійністю вузлів, дозволить перейти від реактивного ремонту «після факту відмови» до стратегії «обслуговування за станом».

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання цифровізації моніторингу автотранспорту та впровадження інтелектуальних систем діагностики сьогодні перебувають у центрі уваги багатьох науковців. Сучасний етап розвитку галузі характеризується переходом від реактивного обслуговування до проактивних стратегій, що базуються на аналізі великих даних та хмарних обчисленнях. Зокрема, у роботі [1] запропоновано модельну структуру прогнозування транспортних засобів з використанням архітектури Big Data, що дозволяє обробляти значні масиви експлуатаційної інформації. Питання інтеграції технічного обслуговування з телематичними системами на основі штучного інтелекту детально розглянуто у дослідженні [2], а практична реалізація інтелектуальних електронних платформ для предиктивного сервісу автотранспортних парків наведена у [3].

Важливим напрямком є використання хмарних систем для прогнозування залишкового ресурсу компонентів, що особливо актуально для сучасних екологічних видів транспорту [4]. Вітчизняні дослідники також акцентують увагу на необхідності впровадження хмарних рішень для інтеграції та аналізу даних дистанційного моніторингу [5]. Прикладом комплексної вебплатформи для управління обслуговуванням та оптимізації продуктивності авто є система «Auto Track» [6].

Окремий пласт досліджень присвячений енергоефективності як індикатору технічного стану. Машинне навчання активно застосовується для прогнозування споживання пального в реальному часі на основі даних ECU [7]. Аналогічні підходи до аналізу енергоспоживання на основі реальних даних водіння, зокрема для електромобілів, висвітлені у роботі [8].

З точки зору програмної реалізації таких систем, наукова спільнота все частіше звертається до сучасних Full-Stack рішень. Стек MERN (MongoDB, Express.js, React, Node.js) демонструє високу ефективність при розробці вебдодатків [9], що підтверджується досвідом створення модулів інформаційних систем для контролю транспорту [10]. Порівняльний аналіз показує переваги MERN над традиційними стеками (PHP, SQL) у контексті швидкодії та масштабованості [11]. Особливе значення при цьому має стратегія моделювання даних у MongoDB, яка дозволяє гнучко працювати з сигналами підключених транспортних засобів [12].

Для застарілого парку техніки («legacy vehicles») розробляються спеціалізовані інтелектуальні системи обслуговування [13], а загальні інноваційні IoT-рішення для відстеження та догляду за автотранспортом пропонуються у праці [14]. При розробці алгоритмів контролю в Україні обов'язковим є врахування методичних рекомендацій щодо нормування витрат пального та енергії [15], які складають нормативну базу розрахунків. Фундаментальною основою для оцінки надійності в таких системах залишаються імовірнісні

моделі, зокрема розвиток застосування розподілів q-Вейбулла в інженерії надійності [16].

Попри значну кількість розробок, залишається потреба у створенні цілісної хмарноорієнтованої системи, яка б поєднувала гнучкість стеку MERN із прикладними моделями надійності (розподіл Вейбулла), адаптованими до аналізу енергоефективності в реальних умовах експлуатації.

Мета статті

Метою цієї роботи є дослідження методів імовірнісного моделювання надійності техніки та розробка на їх основі автономної хмарноорієнтованої вебсистеми на основі стеку MERN. Розроблена система має забезпечувати автоматизований аудит витрат пального, предиктивну діагностику технічного стану автотранспорту за показниками енергоефективності та підвищення коефіцієнта технічної готовності парку машин у складних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення проблеми оперативного управління автопарком та прогнозування його технічного стану було розроблено архітектуру хмарноорієнтованої вебсистеми на основі стеку MERN (MongoDB, Express.js, React, Node.js). Вибір даного технологічного стеку обґрунтовано можливістю створення ізольованого програмного середовища, що може функціонувати в локальних мережах підрозділів без обов'язкового доступу до глобального інтернету.

Головним компонентом системи є діагностичний модуль, який трансформує показники паливної ефективності в імовірнісні оцінки надійності вузлів автомобіля. Алгоритм функціонування системи включає такі етапи:

- 1) автоматизований збір та імпорт даних про заправки й виїзди до бази даних MongoDB;
- 2) розрахунок девіації пального шляхом порівняння фактичного споживання з нормативним із урахуванням коригуючих коефіцієнтів;
- 3) предиктивний аналіз технічного стану через перерахунок параметрів розподілу Вейбулла на основі виявлених перевитрат;
- 4) візуалізація результатів та формування звітності з прогнозуванням дати досягнення критичного рівня ймовірності відмови.

Розглянемо архітектурне проектування системи. Для реалізації високорівневої логіки обрано архітектурний патерн «клієнт-сервер», де серверна частина на базі Node.js забезпечує обчислювальну потужність, а клієнтська частина на React відповідає за інтерфейс. Структура системи включає наступні елементи:

- Database (MongoDB) – нереляційна база даних для гнучкого зберігання журналів виїздів та технічних характеристик техніки;
- Backend (Express.js) – серверний шар, що реалізує API-ендпоінти та бізнес-логіку обробки запитів;

– Frontend (React) – інтерфейсний шар для візуалізації станів автопарку та взаємодії з користувачем.

Для забезпечення високої швидкості обробки великих масивів даних використано асинхронну модель взаємодії Node.js та Express. Це дозволяє автоматично трансформувати вхідні дані з різних форматів (наприклад, CSV-звіти паливних компаній) у структуровані JSON-об'єкти для подальшого аналізу без помилок парсингу.

Локальне збереження даних реалізовано за допомогою нереляційної моделі MongoDB. Це дозволило відмовитися від складних мапінгів SQL-таблиць на користь гнучких JSON-подібних документів. Основні сутності бази даних включають Vehicles (характеристики техніки), FuelLogs (записи про заправки), Trips (маршрути та пробіг) та DiagnosticResults (результати розрахунків).

Ключовим технічним рішенням є розділення обчислювальних потоків для підтримки стабільної роботи інтерфейсу:

– основний потік клієнтської частини на React відповідає за плавність відображення дашбордів та взаємодію з користувачем;

– фонові процеси на серверній стороні виконують ресурсомісткі математичні розрахунки за імовірнісними моделями та обробку запитів до бази даних.

Програмний комплекс використовує захищене зберігання облікових даних та механізми автентифікації, що запобігає витоку конфіденційної інформації про роботу автопарку. Архітектура спроектована таким чином, що заміна або уточнення математичної моделі діагностики потребує лише оновлення відповідного модуля на сервері, не змінюючи логіку роботи всього веб-сервісу.

Функціональна цілісність системи забезпечується через взаємодію автономних модулів, що утворюють єдине середовище обробки інформації. Архітектурне рішення базується на принципі розподілу відповідальності, що дозволяє ізолювати обчислювальну логіку від процесів зберігання та візуалізації даних.

Основними функціональними блоками системи є (рис. 1):

– модуль прогнозування – ключовий обчислювальний центр, де реалізовано розрахунок ймовірності відмови за Вейбуллом та прогнозування середньомісячного пробігу, він здійснює прямий запит до моделей даних для отримання параметрів зносу та запланованих ремонтів;

– модуль аналітики – відповідає за агрегацію статистичних показників та порівняння фактичних даних із нормативними значеннями. Він інтегрується з моделями маршрутних листів, автомобілів та водіїв для формування цілісної картини експлуатації парку;

– модуль управління маршрутними листами виступає основним джерелом даних, забезпечуючи автоматичну перевірку коректності введених показників та миттєве оновлення інформації про фактичний пробіг автомобіля безпосередньо в момент збереження звітної документації;

Шар даних представлений набором схем MongoDB (Repair Model, Car Model, Route Model, Driver Model), що забезпечують збереження всієї технічної та операційної інформації. Модуль звітності та візуалізації трансформує результати аналізу у графічні тренди та табличні звіти для кінцевого користувача.

Взаємозв'язки між програмними модулями реалізовано через систему залежностей, яка мінімізує зв'язність компонентів.

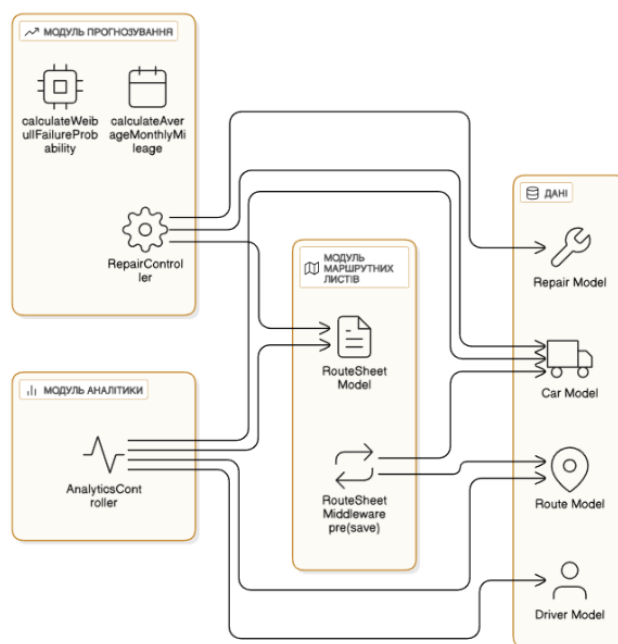


Рис. 1 – Діаграма залежностей між модулями

Наукову новизну розробленого рішення становить алгоритм предиктивної діагностики, що базується на інтегрованому аналізі енергоефективності. Процес оцінки технічного стану реалізовано шляхом послідовного застосування математичних моделей:

1) Розрахунок нормативної бази.

Для кожної одиниці техніки система обчислює нормативне значення витрати пального згідно з методикою, закріпленою у нормативних актах:

$$Q_{norm} = 0.01 \cdot H_S \cdot L \cdot (1 + 0.01 \cdot K_S) + Q_{add}, \quad (1)$$

де H_S – базова лінійна норма витрати пального (л/100 км); L – пробіг автомобіля (км); $K_S = \sum_{i=1}^m K_i$ – сумарний коефіцієнт коригування (робота в гірській місцевості, рух у колоні, зимовий період, бездоріжжя тощо); Q_{add} – додаткова витрата на роботу спецобладнання, прогрів двигуна тощо.

2) Визначення індикатора стану.

На основі порівняння фактичних витрат із розрахованою нормою обчислюється індикатор технічного стану як відсоткову девіацію:

$$I_{ts} = \frac{Q_{fact} - Q_{norm}}{Q_{norm}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Якщо $I_{ts} > \delta$ (де δ – допустима похибка 3–5%), система діагностує наявність аномалії, що інтерпретується як прискорений знос вузлів.

3) Модифікація імовірнісної моделі.

Для прогнозування ресурсу обрано розподіл Вейбулла-Гнеденка. Ключовою відмінністю розробленого методу є введення кореляційної залежності між параметром масштабу та паливною аномалією. Скоригований параметр масштабу розраховується за формулою:

$$\eta_{mod} = \eta_{pas} (1 - \alpha \cdot \tanh(I_{ts})), \quad (3)$$

де η_{pas} – паспортний ресурс агрегату; α – коефіцієнт чутливості ($0 < \alpha < 1$); $\tanh()$ – функція гіперболічного тангенса, що нормалізує відхилення та запобігає отриманню від'ємних значень ресурсу.

4) Прогноз надійності.

З урахуванням модифікації, прогнозна ймовірність безвідмовної роботи набуває вигляду:

$$P_{prog}(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_{mod}}\right)^\beta}, \quad (4)$$

де t – поточний пробіг, β – параметр форми (для періоду зносу військової техніки $1,5 < \beta < 3,5$).

5) Оцінка боездатності.

Кінцевою метрикою системи є інтегральний коефіцієнт технічної готовності всього підрозділу на плановий період:

$$K_{tg} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M P_{prog,i}(T_{plan}), \quad (5)$$

де M – кількість автомобілів у підрозділі.

Такий підхід дозволяє трансформувати дані паливного аудиту в об'єктивні метрики надійності, забезпечуючи перехід від паперової звітності до реального прогнозування боездатності парку.

Розглянемо процес функціонування розробленого вебсервісу для моніторингу та предиктивної діагностики автопарку.

На першому етапі формується цифрова база об'єктів моніторингу. Після авторизації в системі користувач потрапляє до інтерфейсу управління парком. Процес додавання транспортного засобу передбачає введення технічних характеристик: марки, державного номера, типу двигуна та паспортного ресурсу прас. Реактивний інтерфейс на базі React дозволяє редагувати параметри автомобілів «на льоту», що забезпечує актуальність даних при зміні складу підрозділу.

На другому етапі здійснюється систематичне введення та менеджмент експлуатаційних даних. Основним інструментом збору інформації є реєстр маршрутних листів (рис. 2), реалізований у вигляді інтерактивної таблиці. Інтерфейс дозволяє диспетчеру бачити зведену інформацію по кожному виїзду: державний номер автомобіля, ПІБ водія, дату та статус документа. Функціональні елементи керування (кнопки «Edit» та «Delete») забезпечують оперативне редагування даних. При заповненні конкретного звіту користувач вносить:

- фактичний пробіг (L);
- обсяг заправленого та фактично спожитого пального (Q_{fact});
- умови експлуатації (коефіцієнти K) шляхом вибору відповідних пресетів (зимовий період, бездоріжжя, робота в гірській місцевості).

Дата	Автомобіль	Маршрут	Водій	Пробіг (км)	Витрата пального (л)	Дії
31.12.2025	Ford Transit (CC901232)	Дніпро - Кременчук	Петренко Петро Петрович	197	Plan: 18.10 Fact: 18.10 Plan: 18.10	Edit Delete
31.12.2025	Hyundai Tucson (C1335796)	Київ - Харків	Іванов Іван Іванович	501	Plan: 21.10 Fact: 21.10 Plan: 21.10	Edit Delete
30.12.2025	Volkswagen Passat (BB547544)	Київ - Вінниця	Петренко Петро Петрович	563	Plan: 11.10 Fact: 11.10 Plan: 11.10	Edit Delete
29.12.2025	Skoda Octavia (D0K246333)	Київ - Одеса	Мельник Василь Іванович	486	Plan: 17.10 Fact: 17.10 Plan: 17.10	Edit Delete
29.12.2025	Volkswagen Passat (BB547544)	Харків - Одеса	Іванов Іван Іванович	771	Plan: 11.10 Fact: 11.10 Plan: 11.10	Edit Delete

Рис. 2 – Загальний вид вікна управління маршрутними листами

Система автоматично виконує валідацію введених значень, запобігаючи логічним помилкам (наприклад, введенню пробігу, що менший за попередній показник одометра).

На третьому етапі користувач налаштовує параметри аналітичного звіту через головну панель модуля моніторингу (рис. 3). Інтерфейс спроектовано таким

чином, щоб забезпечити максимальну гнучкість аналізу:

- часовий фільтр – дозволяє обрати конкретний період експлуатації для оцінки динаміки зносу;
- селектор об'єктів – надає можливість формувати звіт як по всьому підрозділу, так і по конкретному автомобілю чи водію.

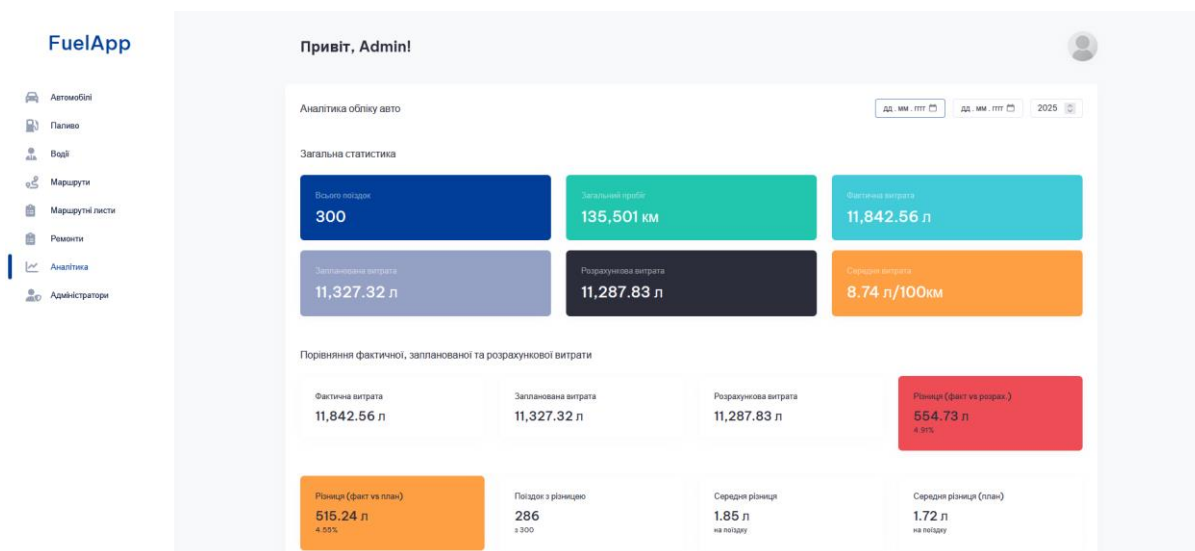


Рис. 3 – Головна панель аналітичного модуля та налаштування параметрів звітності

Після ініціації запиту (кнопка «Submit») система виконує асинхронне звернення до Backend-частини. У цей момент ініціюється розрахунок за математичними моделями (1–5). Завдяки використанню архітектури MERN, результати обчислень – від нормативних витрат до прогнозованого КТГ – миттєво агрегуються та

готуються до візуалізації без перезавантаження сторінки.

На четвертому етапі здійснюється візуалізація та інтерпретація результатів предиктивного аналізу на рівні окремого транспортного засобу (рис. 4).

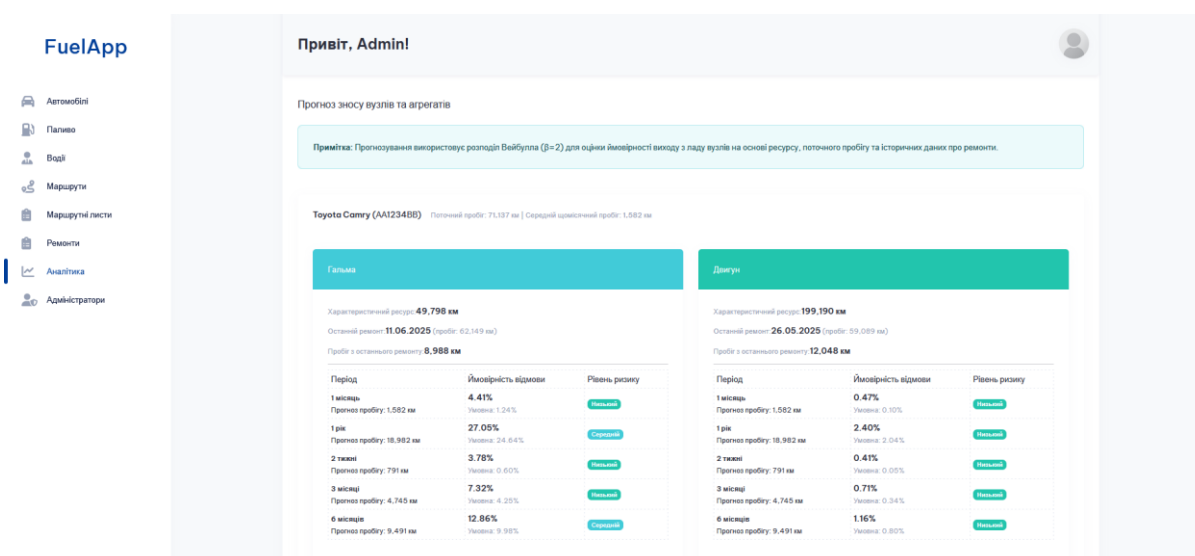


Рис. 4 – Інтерфейс деталізованого аналізу ефективності експлуатації автомобіля

Вихідні дані подаються у вигляді комплексного дашборду, що включає:

- динаміку споживання пального – графік, що дозволяє візуально ідентифікувати сплески витрат, які система інтерпретує як потенційні несправності;
- статистику пробігу – гістограму інтенсивності експлуатації за обраний період;

– аналітичні метрики – розраховані значення загального пробігу, сумарної витрати та середньої ефективності.

Для проведення ретроспективного аналізу та стратегічного планування в системі реалізовано модуль помісячної динаміки експлуатаційних показників (рис. 5).



Рис. 5 – Динаміка витрат пального та пробігу у помісячному розрізі

Використання комбінованої візуалізації дозволяє керівництву підрозділу:

- виявляти сезонні закономірності – порівнювати інтенсивність використання техніки в різні періоди року;
- контролювати питомі витрати – відстежувати кореляцію між зростанням пробігу та обсягами закупівлі пально-мастильних матеріалів;
- прогнозувати бюджетні потреби – на основі історичних даних формувати запити на постачання пального для майбутніх періодів.

Саме така глибина аналітики забезпечує комплексну підтримку прийняття рішень, перетворюючи «сирі» дані маршрутних листів на стратегічну інформацію про готовність автопарку.

На основі цих даних алгоритм автоматично оновлює прогноз ймовірності безвідмовної роботи $P_{prog}(t)$. Якщо крива споживання пального демонструє сталу девіацію вгору, система сигналізує про необхідність позапланової діагностики вузлів, не чекаючи регламентного ТО за пробігом. Це дозволяє реалізувати перехід від планово-запобіжної системи обслуговування до стратегії ремонту за фактичним станом.

Для комплексної оцінки ефективності системи було проведено серію експериментів на базі реальних даних експлуатації 15 одиниць техніки. Важливим етапом дослідження стало порівняння класичної статистичної моделі (що враховує лише пробіг) із розробленою модифікованою моделлю (пробіг + паливний аудит).

Результати порівняльного аналізу (рис. 6) підтверджують гіпотезу про високу релевантність паливних аномалій.

Ефективність випереджаючого виявлення відмов розробленою системою у порівнянні з традиційними методами наведено на рис. 7. Дані свідчать, що у 85% випадків інтегрований аналіз енергоефективності дозволяє ідентифікувати деградацію стану на ранніх етапах.

Одним із ключових практичних результатів впровадження системи стало радикальне підвищення операційної ефективності управління. Апробація показала, що автоматизація процесу обробки маршрутних листів та формування звітів дозволила скоротити час на паперову роботу диспетчера у 7,5 разів (з 45 хвилин до 6 хвилин на один транспортний засіб на добу).

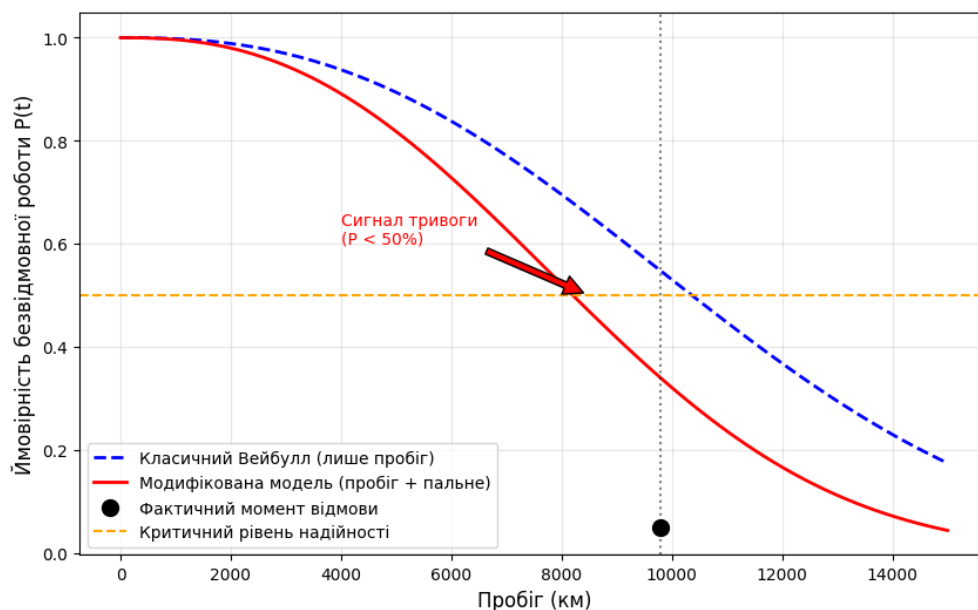


Рис. 6 – Ефект зміщення кривої надійності при виявленні перевитрат пального

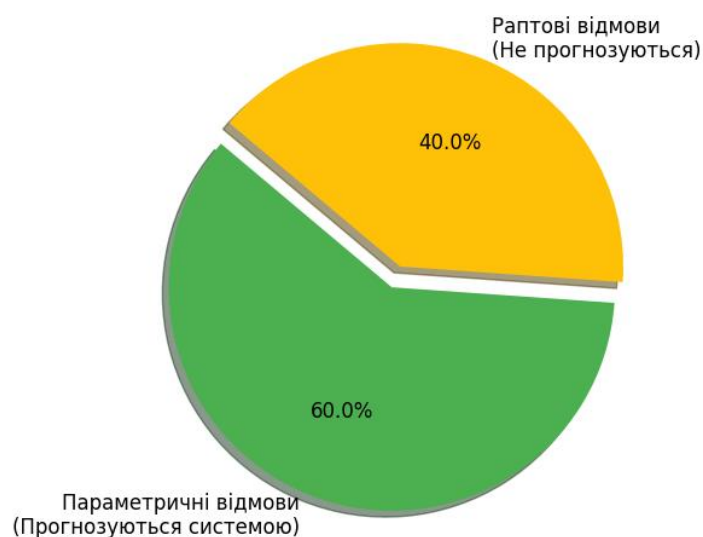


Рис. 7 – Ефективність виявлення відмов розробленою системою

Аналіз експлуатаційних показників свідчить про зростання інтегрального показника КТГ парку на 12%. Це досягнуто завдяки превентивному обслуговуванню, що дозволило уникнути тривалих простоїв техніки. Комплексна позитивна динаміка включає зниження перевитрат пального на 8,4% та зменшення частоти раптових відмов на 18%.

Розроблений вебсервіс демонструє високий рівень адаптивності та може бути масштабований для використання у логістичних центрах, комунальних підприємствах або підрозділах Збройних Сил України для забезпечення максимальної боєздатності транспортного парку.

Висновки

Розроблено архітектуру хмарноорієнтованого вебсервісу на основі стеку MERN (MongoDB, Express.js, React, Node.js), що забезпечує високу швидкість обробки великих масивів експлуатаційних даних та можливість функціонування в ізольованих локальних мережах. Використання асинхронної моделі взаємодії дозволило автоматизувати трансформацію неструктурованих звітів паливних компаній у валідні об'єкти для подальшого аналізу.

У ході дослідження обґрунтовано та реалізовано модифіковану ймовірнісну модель надійності на основі розподілу Вейбулла-Гнеденка. Наукова новизна рішення полягає у введенні кореляційної залежності між

параметром масштабу (ресурсом) та індикатором паливної аномалії через функцію гіперболічного тангенса. Це дозволило трансформувати економічні показники перевитрат пального у технічні метрики ймовірності безвідмовної роботи, забезпечуючи випереджаючу діагностику вузлів.

Апробація системи на базі реальних даних експлуатації автопарку підтвердила її високу практичну ефективність. Впровадження автоматизованого обліку маршрутних листів дозволило радикально оптимізувати роботу диспетчерської служби, скоротивши час на обробку документації у 7,5 разів (з 45 до 6 хвилин на одну одиницю техніки). Суб'єктивна оцінка зручності управління парком при цьому зросла з 4,2 до 9,1 бала за 10-бальною шкалою.

Експериментально доведено здатність розробленого алгоритму ідентифікувати прихований знос агрегатів на ранніх стадіях: модифікована модель фіксує деградацію стану в середньому за 1200–1500 км до моменту фактичної відмови. Це забезпечило зростання інтегрального коефіцієнта технічної готовності (КТГ) парку на 12% та зниження частоти раптових поломок на маршрутах на 18%. Економічний ефект підкріплюється зниженням середніх перевитрат пального на 8,4% завдяки своєчасному виявленню несправностей паливної апаратури.

Подальший розвиток системи вбачається в інтеграції модулів машинного навчання для автоматичного розпізнавання типів дорожнього покриття та рельєфу місцевості через GPS-трекінг. Це дозволить динамічно коригувати нормативну базу витрат пального без ручного введення коефіцієнтів, що ще більше підвищить точність предиктивних прогнозів надійності техніки.

Перелік використаних джерел

- [1] Model-based vehicular prognostics framework using Big Data architecture / A. Petrillo et al. *Computers in Industry*. 2020. Vol. 115. Article 103177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103177>.
- [2] Integrating AI-Driven Predictive Maintenance with Telematics: A Data-Centric Approach / P. D. Gawande. *Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Sciences*. 2025. Vol. 4, iss. 7. Pp. 456–462. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15862327>.
- [3] Massaro A., Selicic S., Galiano A. Predictive Maintenance of Bus Fleet by Intelligent Smart Electronic Board Implementing Artificial Intelligence. *IoT*. 2020. Vol. 1, iss. 2. Pp. 180–197. DOI: <https://doi.org/10.3390/iot1020012>.
- [4] Online Short-Term Remaining Useful Life Prediction of Fuel Cell Vehicles Based on Cloud System / T. Ma et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, iss. 10. Article 2806. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102806>.
- [5] Хмарні рішення для інтеграції та аналізу даних дистанційного моніторингу транспортних засобів / В. Павленко та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. Т. 20, № 2. С. 109–117. DOI: <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.109>.
- [6] Auto Track: A Web Platform to Manage Servicing, Predict Resell Price and Optimize Vehicle Performance / P. Sahane et al. 2024 8th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 06–08 November 2024. Pp. 113–118. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECA63461.2024.10801069>.
- [7] Canal R., Riffel F. K., Gracioli G. Machine Learning for Real-Time Fuel Consumption Prediction and Driving Profile Classification Based on ECU Data. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 68586–68600. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3400933>.
- [8] Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data / Zhang J., Wang Z., Liu P., Zhang Z. *Applied Energy*. 2020. Vol. 275. Article 115408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115408>.
- [9] Study and Usage of MERN Stack for Web Development / S. A. Bafna et al. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2022. Vol. 10, iss. 2. Pp. 178–186. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40209>.
- [10] Граб Д. В. Розробка модуля інформаційної системи на основі стеку MERN. *Інформаційні моделі, системи та технології (IMCT-2024)* : зб. тез доповідей XII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 18–19 грудня 2024. Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 28.
- [11] Goyal V., Mishra A. K., Singh D. Implementation and Comparison of MERN Stack Technology with HTML/CSS, SQL, PHP & MEAN in Web Development. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science (IRJMETS)*. 2023. Vol. 5, iss. 11. Pp. 1424–1431. DOI: <https://doi.org/10.56726/IRJMETS46315>.
- [12] Data Modeling Strategies for Connected Vehicle Signal Data in MongoDB / MongoDB Blog. 2023. URL: <https://www.mongodb.com/company/blog/innovation/data-modeling-strategies-connected-vehicle-signal-data-in-mongodb> (дата звернення: 20.10.2025).
- [13] Intelligent Maintenance System for Legacy Vehicles / W. Acioli e Silva et al. 2025 *IEEE 30th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Porto, Portugal, 09–12 September 2025. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ETFA65518.2025.11205787>.
- [14] Innovative IoT Solutions for Vehicle Maintenance and Tracking / M. B. Begum et al. 2024 *International Conference on Big Data Analytics in Bioinformatics (DABCon)*, Kolkata, India, 21–23 November 2024. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAB-Con63472.2024.10919361>.
- [15] Методичні рекомендації з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та

технікою / О. А. Клименко та ін. Київ : ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2023. 51 с.

- [16] Xu M., Mao H. q-Weibull Distributions: Perspectives and Applications in Reliability Engineering. *IEEE*

Transactions on Reliability. 2025. Vol. 74, no. 3. Pp. 3112–3125. DOI:

<https://doi.org/10.1109/TR.2024.3448289>.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A MERN-BASED CLOUD-ORIENTED WEB SYSTEM FOR PREDICTIVE VEHICLE DIAGNOSTICS BASED ON ENERGY EFFICIENCY INDICATORS

Serhiienko A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1328-2572>, e-mail: sergienko_a_v@pstu.edu;

Tryhub V.

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

The paper presents the results of the comprehensive development and testing of a cloud-oriented web service designed for automated auditing and predictive forecasting of the vehicle fleet's technical condition. The software product is implemented based on the MERN stack (MongoDB, Express.js, React, Node.js), which ensures high processing speed of large datasets and the possibility of deployment in isolated local networks. The key technological feature of the system is the integration of fuel monitoring with probabilistic reliability models. During the research, a modified algorithm based on the Weibull-Gnedenko distribution was substantiated and implemented, where the scale parameter (resource) is dynamically adjusted depending on the fuel anomaly indicator using a hyperbolic tangent function for deviation normalization. The service functionality provides full automation of route sheet validation, calculation of standard fuel consumption considering a complex matrix of correction factors, and real-time visualization of reliability curves for each vehicle unit. An intelligent early warning mechanism for potential engine and transmission malfunctions based on detected energy efficiency deviations has been implemented. Experimental verification confirmed the high efficiency of the chosen architectural solution and the stability of the MongoDB database when working with unstructured logs. The implementation of the system allowed for a reduction in the time for processing and verifying operational documentation by 7.5 times. Based on the testing results, an increase in the technical readiness coefficient (TRC) of the fleet by 12% and a decrease in the frequency of sudden failures by 18% were recorded. It is proved that using modified probabilistic models in web monitoring panels is an effective tool for transitioning from an obsolete scheduled maintenance system to a progressive repair-by-condition strategy. This allows for the identification of key component degradation 1,200–1,500 km before their actual failure, ensuring significant resource savings and increasing the combat readiness of transport units.

Keywords: predictive diagnostics; vehicle technical condition; energy efficiency; fuel consumption; Weibull distribution; reliability theory; cloud-oriented systems; MERN stack; MongoDB; technical readiness coefficient; audit automation; web service.

References

- [1] A. Petrillo, A. Picariello, S. Santini, B. Scarciello, and G. Sperli, "Model-based vehicular prognostics framework using Big Data architecture," *Computers in Industry*, vol. 115, article 103177, 2020. doi: [10.1016/j.compind.2019.103177](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103177).
- [2] P. D. Gawande, "Integrating AI-Driven Predictive Maintenance with Telematics: A Data-Centric Approach," *Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Sciences*, vol. 4, iss. 7, pp. 456–462, 2025. doi: [10.5281/zenodo.15862327](https://doi.org/10.5281/zenodo.15862327).
- [3] A. Massaro, S. Selicato, and A. Galiano, "Predictive Maintenance of Bus Fleet by Intelligent Smart Electronic Board Implementing Artificial Intelligence," *IoT*, vol. 1, iss. 2, pp. 180–197, 2020. doi: [10.3390/iot1020012](https://doi.org/10.3390/iot1020012).
- [4] T. Ma, J. Xu, R. Li, N. Yao, and Y. Yang, "Online Short-Term Remaining Useful Life Prediction of Fuel Cell Vehicles Based on Cloud System," *Energies*, Vol. 14, iss. 10, article 2806, 2021. doi: [10.3390/en14102806](https://doi.org/10.3390/en14102806).
- [5] V. Pavlenko, V. Pavlenko, V. Manuylov, V. Kuzhel, and A. Buda, "Khmarini rishennia dlia intehratsii ta analizu danykh dystantsiinoho monitorynhu transportnykh zasobiv" ["Cloud solutions for data integration and analysis in remote vehicle monitoring"], *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Journal of mechanical engineering and transport*, vol. 20, № 2, pp. 109–117, 2024. doi: [10.63341/vjmet/2.2024.109](https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.109).
- [6] P. Sahane, Y. Chavan, S. Ashtagi, A. Avhad, and S. Gaikwad, "Auto Track: A Web Platform to Manage Servicing, Predict Resell Price and Optimize Vehicle Performance," in *Proc. of the 2024 8th Int. Conf. on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, November 06–08, 2024, pp. 113–118. doi: [10.1109/ICECA63461.2024.10801069](https://doi.org/10.1109/ICECA63461.2024.10801069).
- [7] R. Canal, F. K. Riffel, and G. Gracioli, "Machine Learning for Real-Time Fuel Consumption Prediction

- and Driving Profile Classification Based on ECU Data,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 68586–68600, 2024. doi: [10.1109/ACCESS.2024.3400933](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3400933).
- [8] J. Zhang, Z. Wang, P. Liu, and Z. Zhang, “Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data,” *Applied Energy*, Vol. 275, article 115408, 2020. doi: [10.1016/j.apenergy.2020.115408](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115408).
- [9] S. A. Bafna, P. D. Dutonde, S. S. Mamidwar, M. S. Korvate, and D. Shirbhare, “Study and Usage of MERN Stack for Web Development,” *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 10, iss. 2, p. 178–186, 2022. doi: [10.22214/ijraset.2022.40209](https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40209).
- [10] D. V. Hrab, “Rozrobka moduliu informatsiinoi systemy na osnovi steku MERN” [“Development of a system-grounded criterion of optimal control”], in *Proc. of the XII Int. Sci.-Techn. Conf. «Information Models, Systems and Technologies (IMST-2024)»*, Ternopil, Ukraine, December 18–19, 2024, p. 28.
- [11] V. Goyal, A. K. Mishra, D. and Singh, “Implementation and Comparison of MERN Stack Technology with HTML/CSS, SQL, PHP & MEAN in Web Development,” *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science (IRJMETS)*, vol. 5, iss. 11, pp. 1424–1431, 2023. doi: [10.56726/IRJMETS46315](https://doi.org/10.56726/IRJMETS46315).
- [12] Data Modeling Strategies for Connected Vehicle Signal Data in MongoDB / MongoDB Blog, 2023. [Online]. Available: <https://www.mongodb.com/com-pany/blog/innovation/data-modeling-strategies-connected-vehicle-signal-data-in-mongodb>. Accessed on: October 20, 2026.
- [13] W. Acioli e Silva, J. Junior Abularach Arnez, M. G. Lima Damasceno, R. Landau Paiva de Medeiros, I. V. de Bessa, and V. Ferreira de Lucena Junior, “Intelligent Maintenance System for Legacy Vehicles,” in *Proc. of the 2025 IEEE 30th Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Porto, Portugal, September 09–12, 2025, pp. 1–4. doi: [10.1109/ETFA65518.2025.11205787](https://doi.org/10.1109/ETFA65518.2025.11205787).
- [14] M. Baritha Begum, S. J. Muhammed Suhail, J. Sang-eetha Priya, J. Eindhumathy, G. Sivakannu, A. Kesavan, “Innovative IoT Solutions for Vehicle Maintenance and Tracking,” in *Proc. of the 2024 Int. Conf. on Big Data Analytics in Bioinformatics (DAB-Con)*, Kolkata, India, November 21–23, 2024, pp. 1–6. doi: [10.1109/DABCon63472.2024.10919361](https://doi.org/10.1109/DABCon63472.2024.10919361).
- [15] O. A. Klymenko et al., *Metodychni rekomendatsii z normuvannia vytrat palyva, elektrychnoi enerhii, mastylnykh, inshykh ekspluatatsiinykh materialiv avtomobiliamy ta tekhnikoju* [Methodological recommendations for the rationing of fuel, electricity, lubricants, and other operating materials by vehicles and equipment]. Kyiv, Ukraine : State Enterprise «DerzhavtotransNIIproekt», 2023.
- [16] M. Xu, and H. Mao, “q-Weibull Distributions: Perspectives and Applications in Reliability Engineering,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 74, no. 3, pp. 3112–3125, 2025. doi: [10.1109/TR.2024.3448289](https://doi.org/10.1109/TR.2024.3448289).

Стаття надійшла 18.12.2025

Стаття прийнята 15.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Сергієнко А. В., Тригуб В. П. Дослідження та розробка хмарноорієнтованої вебсистеми на основі стеку MERN для предиктивної діагностики автотранспорту за показниками енергоефективності. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 23–32. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359764>.

ІНТЕГРАЦІЯ POLICY LAYER У NL2SQL-СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ДОСТУПУ
ДО ЧУТЛИВИХ ДАНИХ

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 ;
Новоселова А.С.	магістр, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2854-5569 , e-mail: anastasiia.novoselova@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

У статті розглянуто проблему відсутності механізмів контролю доступу в сучасних NL2SQL-системах, які зосереджуються переважно на підвищенні точності генерації SQL-запитів мовними моделями та не враховують ризиків витіку конфіденційних даних. Проаналізовано наявні підходи, що демонструють високу якість перетворення природної мови на SQL-запит, однак не забезпечують перевірку ролей користувачів, політик доступу та чутливості атрибутів. Запропоновано вдосконалену архітектуру NL2SQL-системи з інтегрованим Policy Layer, що являє собою проміжний сервіс, який виконує синтаксичний аналіз запиту, оцінює його ризик, порівнює зі встановленими політиками безпеки та за необхідності автоматично переписує SQL-запит або блокує його виконання. Рішення базується на побудові абстрактного синтаксичного дерева та формальному аналізі структури SQL-запиту, що дозволяє запобігати доступу до чутливих даних незалежно від коректності чи точності роботи мовної моделі.

Ключові слова: NL2SQL; LLM; велика мовна модель; SQL; Policy Layer; оцінка ризику.

Вступ

У сучасних інформаційних системах спостерігається стрімке зростання обсягу даних, що супроводжується потребою в зручних механізмах доступу до них. Цей розвиток спричинив появу та активне поширення систем перетворення природної мови (NL) в SQL (NL2SQL), які дозволяють користувачам формувати запити до баз даних звичайними фразами без спеціальних знань у галузі програмування чи реляційної алгебри. Завдяки інтеграції моделей машинного навчання та великих мовних моделей (LLM), NL2SQL-підходи стали особливо популярними в аналітичних системах, корпоративних інструментах, чат-ботах, користувацьких інтерфейсах та інтелектуальних помічниках [1].

Проте разом із підвищенням доступності даних, виникла низка проблем, пов'язаних із безпекою даних. Більшість сучасних NL2SQL-систем зосереджуються на точності синтаксичного й семантичного перетворення, але не враховують контекст користувача: його роль, рівень доступу, дозволені операції, а також політики безпеки, прийняті в організації [2]. За відсутності механізмів контролю, сформовані запити можуть розкривати конфіденційну інформацію, ініціювати небезпечні операції чи обходити системи контролю доступу. Отже, виникає потреба в архітектурі, яка доповнюватиме NL2SQL-системи спеціальним шаром безпеки (Policy Layer), у якому будуть зосереджені механізми перевірки політик безпеки, фільтрацію та безпечне переписування згенерованих SQL-запитів перед їх виконанням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В останні роки спостерігається значне зростання наукового інтересу до проблеми перетворення природної мови в SQL (Text-to-SQL, NL2SQL). Значна частина робіт спрямована на підвищення точності генерації SQL-запитів за допомогою великих мовних моделей та адаптивних навчальних методик. Проте, незважаючи на відчутний прогрес у якості трансляції NL в SQL, аналіз сучасних публікацій показує, що питання перевірки політик доступу, контролю прав користувача та блокування небезпечних SQL-конструкцій майже не розглядаються. Найбільший фокус досліджень направлений на якість генерації вихідного SQL, обробки складних структур запитів, зменшення помилок у JOIN, удосконалення семантичної відповідності тощо.

У роботі «HITSQL: Human-In-The-Loop Techniques for Enhancing Text-to-SQL Query Generation with Large Language Models» запропоновано модель, спрямовану на покращення точності генерації SQL у корпоративних середовищах на основі прогресивного активного навчання [3]. Автори наголошують на необхідності мінімізувати кількість помилок у трансляції запитів для бізнес-платформи SAP Business One. Методика передбачає поступове збагачення навчальних даних, поєднання експертного зворотного зв'язку та адаптивного донавчання, що забезпечило високий рівень точності – до 97% на незалежних тестових наборах. У статті розглядаються компоненти оцінки виконання SQL, методи порівняння компонентів запиту та семантичні евристичні, проте у фокусі перебуває виключно підвищення точності генерації, а не перевірка прав

доступу, не обмеження SQL-операцій і не формування середовища безпечного виконання транслірованих запитів. Автори не описують ані елементів контрольного шару між NL-моделлю і СУБД, ані механізмів, здатних запобігти витокам конфіденційної інформації у випадку коректної, але небезпечної для підприємства генерації SQL.

Подібним чином, у дослідженні «AID-SQL: Adaptive In-Context Learning of Text-to-SQL with Difficulty-Aware Instruction and Retrieval-Augmented Generation» розглянуто адаптивний механізм in-context learning, який дозволяє підвищити ефективність Text-to-SQL трансляції за допомогою класифікації складності запитів, ланцюгових стратегій міркування (Chain of Thought) та retrieval-augmented generation [4]. Автори пропонують інноваційний підхід до вибору прикладів few-shot навчання шляхом оцінки їхньої релевантності за спеціалізованою моделлю ранжування. Усі ці методи спрямовані на покращення розуміння великими мовними моделями семантики природних запитів і синтаксису SQL. Однак, попри значний технічний внесок у сферу адаптивного навчання для NL2SQL, дослідження не розглядає аспекти безпеки, пов'язані з виконанням згенерованих запитів, та не пропонує механізмів перевірки прав доступу, контролю чутливості даних або блокування потенційно небезпечних SQL-операцій.

У статті «A Closed-Domain Natural Language Database Query System by LLMs» автори частково торкаються тематики приватності даних у системах, інтегрованих із великими мовними моделями [5]. У даному матеріалі пропонується реалізація локально розгорнутої системи запитів до структурованих даних, що дозволяє уникнути передачі корпоративних даних у зовнішні LLM-сервіси. Таким чином підвищується рівень приватності та інформаційної безпеки у порівнянні з хмарними рішеннями. Проте навіть у цьому випадку приватність розглядається лише у контексті інфраструктурного розгортання, тобто мінімізації ризиків витоку через зовнішні API. Питання внутрішніх політик доступу, перевірки ролей користувача та контролю за змістом самих згенерованих SQL-команд у статті не розкрито. Система забезпечує конфіденційність отриманих даних, однак не містить механізму аналізу та фільтрації SQL-запитів, що дозволяють або забороняють конкретні дії відповідно до регламентів підприємства.

Окремий підхід до забезпечення безпечної генерації SQL-запиту пропонується у статті «How to Safely Use LLMs for Text-to-SQL with Stored Procedures», у якій автор описує можливість реалізації функції перевірки політик доступу безпосередньо на LLM [6]. Основна ідея полягає в тому, що LLM не лише транслює природню мову в SQL, а й повинна одразу формувати «безпечний» запит, який відповідає заздалегідь визначеним правилам. У статті наголошується, що замість використання додаткової логіки в застосунку або окремого валідаційного шару, модель має бути навчена або сконфігурована таким чином, щоб ніколи не

генерувати SQL, який порушує встановлені вимоги. Автори пропонують застосування збережених процедур, шаблонних промптів і вбудованих правил у самій LLM для обмеження типів операцій та дозволених таблиць.

Попри практичну цінність цього підходу, він має суттєве обмеження: контроль безпеки повністю делегується моделі, яка за своєю природою є стохастичною і може помилятися. Лінгвістичні та генеративні помилки LLM, а також її схильність до «галюцинацій», можуть призвести до формування некоректних або небезпечних SQL-запитів навіть за наявності інструкцій [7]. Це означає, що такий підхід не забезпечує гарантованого виконання політик, оскільки відсутній незалежний валідатор, який би аналізував згенерований SQL до його передачі в базу даних. Таким чином, хоча ідея інкорпорування політик у LLM є перспективною для зниження кількості помилок, вона не може повністю замінити архітектурний Policy Layer, який забезпечує формальний, визначальний і передбачуваний рівень контролю безпеки.

Таким чином, після аналізу вищеперелічених робіт, можна зробити висновок, що більшість Text-to-SQL досліджень концентруються на:

- підвищенні точності генерації SQL;
- семантичній відповідності між NL-запитом і SQL-структурою;
- оптимізації навчальних наборів, інструкцій та політик LLM;
- зменшенні помилок у складних сценаріях (JOIN, вкладені запити, агрегації).

Навіть у роботах, де порушується питання приватності або безпеки, основний фокус зводиться до інфраструктурних аспектів розгортання або до спроб навчити саму LLM генерувати «безпечні» запити, не застосовуючи незалежного механізму формального контролю.

Зважаючи на проведений аналіз, можна виокремити актуальна дослідницьку нішу, що сфокусована на архітектурному проектуванні та реалізації Policy Layer. Ключове призначення цього компонента полягає в перевірці згенерованого NL2SQL-системою SQL-запиту на відповідність політикам безпеки компанії.

Висновки, отримані в результаті огляду наукової літератури, свідчать про нестачу уваги до систематичного запобігання несанкціонованого доступу до даних через згенеровані SQL-запити, що підтверджує наукову новизну досліджень у сфері розробки Policy Layer для NL2SQL-систем.

Мета статті

Метою дослідження є архітектурне проектування та реалізація компонента Policy Layer у складі NL2SQL-системи, що забезпечує детермінований і формальний контроль безпеки шляхом синтаксичного аналізу згенерованого SQL-запиту, комплексної оцінки ризику (на основі чутливості атрибутів,

небезпечності операцій та рівня розкриття даних) та, за необхідності, автоматичного переписування запитів для гарантованої відповідності корпоративним політикам доступу до даних.

Постановка проблеми

Нехай розглядається компанія з розробки програмного забезпечення, у якій працюють співробітники різних посадових рівнів: розробники, тестувальники, менеджери проєктів, аналітики, а також працівники фінансового відділу, зокрема бухгалтер, який має офіційний доступ до інформації про заробітні плати та фінансові операції. Усі інші співробітники, включно з технічним персоналом, не повинні мати доступу до конфіденційних фінансових даних, оскільки ці відомості регулюються внутрішніми політиками безпеки та юридичними нормами щодо захисту персональних даних.

Розглянемо сценарій використання системи NL2SQL на вищеописаному підприємстві. Співробітник компанії, який займає посаду розробника програмного забезпечення (ПЗ), формує запит вигляду: «Покажи заробітні плати всіх співробітників компанії». NL2SQL-модель опрацює цей запит і генерує синтаксично коректний SQL-вираз, який може мати вигляд: `SELECT full_name, salary FROM employees`. Якщо використовується NL2SQL система не має механізму перевірки політик, такий запит буде виконано, і користувач фактично отримає доступ до конфіденційної інформації, яку бачити не повинен. Проблема ускладнюється тим, що модель, згенерувавши SQL, не враховує ні рівень доступу користувача, ні списки дозволених таблиць, ні обмеження на чутливі поля. Вона працює виключно з текстом і статистичними закономірностями, а не з політиками безпеки чи ролями, визначеними в організації. Навіть якщо сформований SQL є синтаксично і семантично правильним, він може становити загрозу для безпеки. Це можна формалізувати через інтегральну оцінку ризику SQL-запиту:

$$R = w_1 * S + w_2 * O + w_3 * E, \quad (1)$$

де R – інтегральна оцінка ризику SQL-запиту;

S – ступінь чутливості атрибутів (Sensitivity);

O – небезпечність виконуваної операції (Operation Severity);

E – рівень потенційного розкриття даних (Exposure Level);

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожної складової.

У розрахунку ризику параметр S зростає, коли SQL-запит звертається до чутливих даних, таких як заробітна плата (salary) чи персональні дані співробітників, такі як платіжні реквізити, домашня адреса тощо, тобто до даних, що підлягають посиленому захисту. Значення параметра O збільшується у випадках, коли операція, яку виконує запит, є потенційно небезпечною: наприклад, команда `DELETE` або `UPDATE` без умови `WHERE` становить підвищений ризик неконтрольованої модифікації даних. Параметр E характеризує

рівень можливого розкриття інформації та набуває більшого значення, якщо запит повертає великі обсяги даних, наприклад, не містить обмеження `LIMIT` або охоплює всю таблицю. Вагові коефіцієнти w_1, w_2, w_3 визначаються політикою безпеки організації й задають відносну важливість кожного з вказаних факторів у загальній оцінці ризику запиту.

У випадку із запитом про заробітні плати ризик є високим, тобто: $R(\text{Query}) \gg 0$, але NL2SQL-модель не завжди здатна це оцінити. Вона працює виключно з текстом і статистичними закономірностями, не маючи уявлення про роль користувача, дозволені таблиці, обмеження на чутливі поля чи внутрішні політики безпеки підприємства. У результаті навіть «коректний» із технічної точки зору SQL-запит може порушувати вимоги безпеки та призводити до витоку даних.

Таким чином, основна проблема полягає в тому, що NL2SQL-моделі залишаються «сліпими» до контексту користувача та корпоративної політики безпеки, а отже, можуть неявно порушувати правила доступу до даних. Це вимагає розробки додаткового захисного рівня – Policy Layer, який аналізує згенерований SQL, виявляє небезпечні конструкції, забороняє несанкціоновані операції та забезпечує відповідність запиту політикам підприємства.

Виклад основного матеріалу

У загальному вигляді робота NL2SQL-системи полягає в автоматичному перетворенні NL запиту користувача на SQL-запит, який може бути виконаний у реляційній базі даних. На першому етапі користувач формує запит у текстовій формі, наприклад: «Покажи заробітні плати всіх співробітників». Цей запит надходить у застосунок, який виступає проміжною ланкою між користувачем, моделлю та базою даних. Далі застосунок передає отриманий текст великій мовній моделі (LLM), формуючи відповідну підказку (prompt) для перетворення природної мови на SQL. Модель аналізує текст, виконує структурну та семантичну інтерпретацію запиту і на основі цього генерує SQL-команду, наприклад: `SELECT full_name, salary FROM employees`.

Процес перетворення запиту включає кілька послідовних етапів обробки. Модель спершу розпізнає ключові елементи NL запиту – такі як поняття «заробітні плати» та «співробітники» – і зіставляє їх із відповідними об'єктами бази даних, тобто таблицями та колонками, у цьому випадку із таблицею `employees` та полем `salary`. Після цього LLM визначає структуру потрібного SQL-запиту: встановлює, що користувач прагне прочитати дані, а не модифікувати їх, і формує оператор `SELECT`. У типовій NL2SQL-системі ці етапи охоплюють розпізнавання наміру, виявлення сутностей і їх прив'язку до схем бази даних (schema linking), що й дозволяє отримати готовий SQL-запит [8].

На останньому етапі застосунок приймає SQL-запит, надісланий моделлю, виконує його у базі даних

і повертає відповідь користувачу. Таким чином, система приховує для користувача механізм взаємодії з базою даних: він вводить звичайне текстове питання, а система автоматично обробляє його, транслює у SQL та повертає результат. Поданий на рисунку 1, процес

демонструє вищеописаний цикл перетворення NL у SQL-запит: від запиту користувача, до генерації SQL-команди моделлю, і, у кінці, до одержання результатів виконання без необхідності ручного написання запитів.

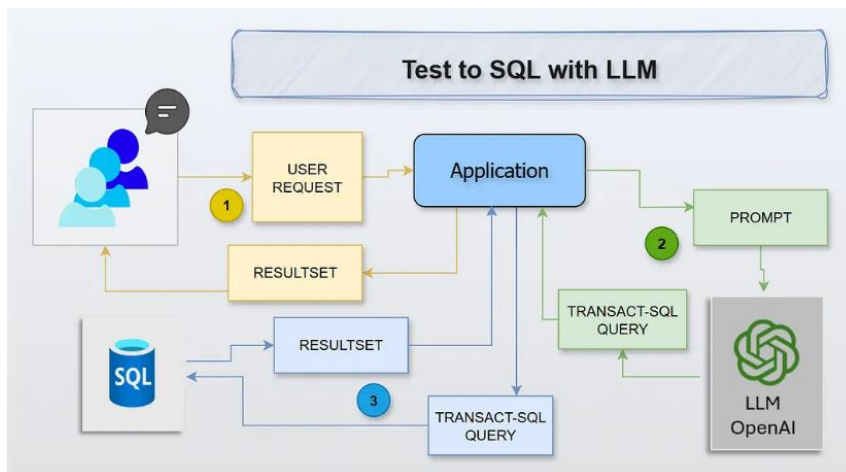


Рис. 1 – Загальна архітектура системи NL2SQL [6]

З рис. 1 видно, що у стандартних архітектурах систем перетворення природної мови в SQL, відсутній будь-який проміжний механізм контролю згенерованого запиту перед його виконанням у базі даних. Запит, згенерований великою мовною моделлю, передається застосунком безпосередньо до СУБД, де виконується без додаткової перевірки на відповідність політикам доступу, ролям користувачів або чутливості даних. Така схема орієнтована на автоматизацію та зручність, але не враховує ризики, пов'язані з некоректною або небезпечною генерацією SQL-команд. Відсутність Policy Layer означає, що безпека цілком залежить від якості та передбачуваності моделі, що створює значні загрози в корпоративних середовищах, де доступ до даних суворо регламентується [9].

З огляду на те, що типовим NL2SQL-системам бракує механізмів контролю безпеки згенерованих SQL-запитів, виникає потреба у впровадженні спеціального архітектурного прошарку – Policy Layer. Існує кілька варіантів його технічної реалізації, які відрізняються розташуванням у системі, рівнем доступу до інформації та можливістю впливати на структуру SQL. Першим підходом є створення Policy Layer у вигляді зовнішнього SQL Proxy Firewall, розміщеного між NL2SQL-моделлю та базою даних [10]. У цьому випадку всі запити проходять через незалежний фільтр, що аналізує синтаксис і структуру SQL, перевіряє відповідність ролям користувачів та корпоративним правилам доступу. Такий варіант забезпечує високий рівень безпеки, оскільки перевірка здійснюється ізольовано від логіки основної системи, проте він потребує складнішої інфраструктури та може впливати на продуктивність у масштабованих середовищах.

Іншим напрямом є інтеграція Policy Layer безпосередньо в NL2SQL-сервіс як внутрішнього модуля. У цьому випадку механізм контролю працює зі згенерованими SQL-запитами до їх передачі в базу даних, що дозволяє не лише блокувати небезпечні операції, але й переписувати SQL для приведення його у відповідність до політик. Такий підхід забезпечує найбільшу гнучкість, оскільки може використовувати інформацію про роль користувача, контекст запиту та специфіку даних, а також зберігає можливість динамічної адаптації політик без змін у СУБД. Третій можливий підхід передбачає переміщення функцій Policy Layer безпосередньо на рівень бази даних, інтегруючи їх через механізми плагінів або розширень. Подібні рішення вже існують у комерційних СУБД, де системи firewall-типу контролюють SQL, що надходить до БД, блокуючи запити, які не відповідають затвердженим політикам. Перевага цього підходу полягає у тому, що саме БД є останнім і найкритичнішим місцем контролю доступу, однак реалізація залежить від можливостей конкретної СУБД і може бути менш універсальною [11].

Окремий сучасний підхід передбачає спробу «вбудувати» політики безпеки безпосередньо у LLM шляхом формування спеціальних промптів або створення шаблонів, які повинні обмежувати генерацію SQL відповідно до визначених правил. Такий метод дозволяє зменшити кількість небезпечних запитів, оскільки модель заздалегідь отримує інструкції не використовувати певні операції або таблиці. Проте його принципова слабкість полягає в тому, що відповідальність за дотримання політик переноситься на стохастичний алгоритм, який не гарантує детермінованої поведінки. LLM може помилятися, іноді ігнорувати інструкції або формувати небезпечні запити через

«галюцинації», що робить цей варіант найменш надійним у критичних корпоративних умовах.

Усі наведені підходи демонструють різний рівень безпеки, контрольованості та інтеграційної складності, що дозволяє обрати архітектуру відповідно до вимог конкретного підприємства. Узагальнене порівняння

основних характеристик (Таблиця 1) показує відмінності між варіантами реалізації: незалежність від LLM, здатність фільтрувати небезпечні операції, можливість переписування SQL, а також відповідність політикам доступу.

Таблиця 1

Порівняння архітектур реалізації Policy Layer

Критерій порівняння	SQL Proxy Firewall	Внутрішній модуль у NL2SQL системі	Плагін у СУБД	Налаштування політик безпеки в LLM
Контроль ролей і доступів	+	+	+	± (не гарантується)
Контроль чутливих колонок	+	+	+	± (не гарантується)
Блокування небезпечних операцій	+	+	+	± (не гарантується)
Можливість переписування SQL	–	+	–	–
Залежність від конкретної СУБД	–	–	+	–
Простота інтеграції	–	+	–	+
Надійність і передбачуваність	+	+	–	–
Продуктивність	±	+	+	+
Захист незалежний від якості LLM	+	+	+	–

У результаті порівняння архітектур реалізації Policy Layer можна зробити висновок, що технічно найбільш гнучким та найбільш збалансованим підходом вважається внутрішній Policy Layer, оскільки він поєднує достатню гнучкість інтеграції з високим рівнем контрольованості. Найвищий рівень гарантій безпеки забезпечує інтеграція Policy Layer на рівні СУБД, адже саме база даних є останньою точкою прийняття рішення щодо виконання запитів. Зовнішній SQL Proxy Firewall пропонує додаткову ізоляцію й підвищений захист, але вимагає складнішої інфраструктури, що може обмежувати його практичну застосовність у масштабованих середовищах. Натомість підхід, заснований на вбудованні політик у LLM, може використовуватися як допоміжний інструмент для зменшення кількості небезпечних SQL-запитів, проте не може розглядатися як самостійний і надійний механізм, оскільки залежить від стохастичної природи моделей та їхньої потенційної непередбачуваності.

Висновки, отримані за результатами порівняння, свідчать, що ефективне впровадження політик доступу в NL2SQL-системах потребує незалежного, детермінованого компонента контролю, який не покладається на ймовірнісну поведінку мовної моделі. Саме тому найбільш перспективним і практично придатним є підхід із реалізацією внутрішнього Policy Layer або спеціалізованого модуля на рівні СУБД. Такі рішення здатні гарантувати виконання корпоративних політик незалежно від того, як саме сформулювала SQL-вираз сама LLM.

У даній роботі розглядається впровадження внутрішнього Policy Layer, тобто проміжного програмного компонента, який інтегрується безпосередньо в застосунок, що працює з NL2SQL-моделлю. У запропонованому рішенні Policy Layer функціонує як окремий сервіс, написаний на Java 17, що отримує згенерований SQL-запит, перетворює його у внутрішню структуру, перевіряє на відповідність корпоративним політикам, оцінює рівень ризику та за необхідності переписує або блокує запит. Після цього застосунок отримує безпечний SQL і лише тоді передає його до бази даних. Таким чином, цей компонент виступає самостійним захисним шаром, незалежним від LLM, і забезпечує детермінований, формальний контроль над SQL-операціями.

Центральною точкою входу внутрішнього Policy Layer є клас PolicyLayerFacade, який реалізує односторонній шаблон проектування Facade. Використання зазначеного патерну забезпечує уніфікований інтерфейс до складної підсистеми, приховуючи від зовнішніх компонентів, зокрема, NL2SQL-служби або бізнес-логіки застосунку, внутрішню роботу Policy Layer [12]. Завдяки цьому клієнтські модулі взаємодіють лише з одним методом даного класу, не маючи потреби керувати послідовністю викликів таких компонентів, як модуль AST-парсингу, валідатор доступу, детектор чутливих полів, механізм переписування запитів або журнал дій.

У метод process() класу PolicyLayerFacade передається згенерований LLM SQL-запит та інформація про користувача, який ініціював виконання даного запиту. Інформація про користувача включає в себе його

ідентифікатор та посаду, яку він займає в поточний момент часу. Далі виконується послідовний виклик усіх необхідних підкомпонентів та повертає безпечний SQL або сигналізує про блокування запиту.

Клас `SqlAstParser` відповідає за перетворення SQL-запиту у внутрішню структуру `SqlAstNode`. Для парсингу отриманого SQL-запиту використовується бібліотека `JSqlParser`. `JSqlParser` аналізує SQL-запит та перетворює його в ієрархію Java-класів [13]. Згенерованою ієрархією можна переміщуватися за допомогою шаблону відвідувача (`Visitor`). `JSqlParser` не обмежується однією базою даних, але забезпечує підтримку багатьох СУБД, таких як `Oracle`, `SqlServer`, `MySQL`, `PostgreSQL` тощо. У результаті роботи парсера формується абстрактне синтаксичне дерево (AST), яке являє собою внутрішню модель SQL-запиту, яка відображає

його логічну структуру. AST містить інформацію про тип операції (`SELECT`, `UPDATE`, `DELETE` тощо), перелік таблиць та колонок, наявність операцій `JOIN`, структуру умов `WHERE`, використані агрегатні функції та інші елементи запиту. На відміну від текстового подання, AST забезпечує можливість аналізувати запит на рівні логічних конструкцій і семантичних зв'язків, що є критично важливим для даної задачі. Саме на основі AST формується спрощена, але контрольована внутрішня модель `SqlAstNode`, яка містить лише ті елементи, що необхідні `Policy Layer`: список таблиць і колонок, їх чутливість, структуру умов, наявність `SELECT *`, оцінку можливого обсягу вибірки та інші характеристики, що використовуються в механізмі оцінки ризику та переписування запитів (рис. 2).

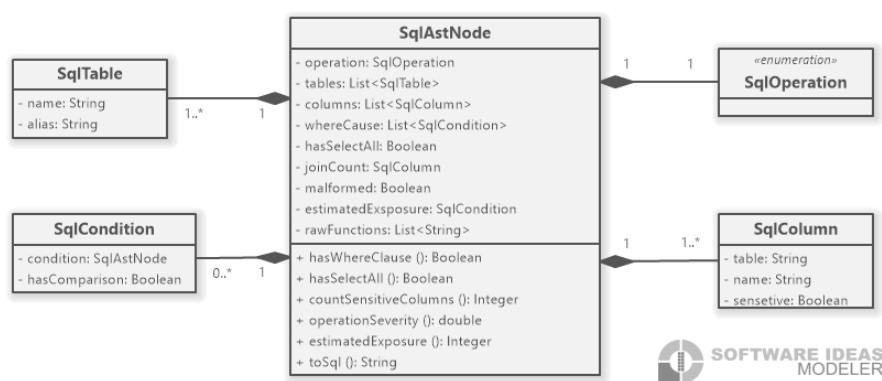


Рис. 2 – UML діаграма класу `SqlAstParser` та пов'язаних із ним класів

На основі отриманого AST виконується валідація SQL-запиту відповідно до політик безпеки компанії. Для цього розроблено клас `AccessPolicyValidator` із методом `validate`, який реалізує логіку зіставлення структури запиту з політиками доступу. У роботі передбачається, що політики доступу зберігаються у вигляді YAML-файлів, що містять перелік ролей, дозволених таблиць і колонок, а також рівні чутливості. YAML-формат вигідний тим, що є зрозумілим для адміністраторів і легко розширюваним [14]. Зокрема, можна описати політики доступу відповідно до посад: `junior developer`, `middle`, `senior`, `QA`, молодший бухгалтер тощо. Для збереження політик використовується клас `PolicyRepository`. Валідація будується на перевірці того, чи має користувач право читати відповідні таблиці/колонки й виконувати потрібні операції. Метод `validate` отримує на вхід `UserContext` та структуру SQL-дерева. Якщо користувач не має права читати значення колонки `salary`, валідатор фіксує порушення й передає його далі до модуля оцінки ризику.

Після перевірки доступів викликається метод `detectSensitiveFields()` класу `AccessPolicyValidator`, який визначає наявність у запиті колонок із підвищеною чутливістю. Логіка роботи цього методу базується на аналізі абстрактного синтаксичного дерева

(`SqlAstNode`) та зіставленні колонок, присутніх у частині із `SELECT` або у фільтрах запиту, із внутрішнім реєстром чутливих полів. Для цього використовується окремий клас-репозиторій `SensitiveFieldRegistry`, який містить перелік таблиць і колонок, позначених як чутливі відповідно до політик безпеки підприємства. Якщо під час аналізу виявлено, що SQL-запит звертається до таких полів, цей факт фіксується у структурі AST, а запит позначається як потенційно ризиковий ще до етапу обчислення інтегральної оцінки ризику. Це дозволяє `Policy Layer` реагувати на такі ситуації на ранніх стадіях, або посилюючи вагові коефіцієнти під час обчислення ризику, або ініціюючи переписування запиту для виключення чутливих атрибутів, або ж здійснюючи негайне блокування запиту у випадку порушення критичних політик доступу.

Інтегральна оцінка ризику SQL-запиту, яка розраховується за формулою (1), розраховується у методі `calculateRisk()` класу `RiskCalculator`. На вхід передаються результати роботи попередніх модулів, а на виході метод повертає значення від 0 до 1, де 0 інтерпретується як повністю безпечний запит, що не становить ризиків витоку або модифікації даних, а 1 – як максимально небезпечна операція, що може призвести до суттєвих порушень політик доступу, розкриття

чутливої інформації або руйнівних змін у базі даних. Запити, що перевищують порогове значення, автоматично блокуються або передаються у модуль переписування.

Для зниження кількості заблокованих запитів у сервіс додано модуль Query Rewriter – компонент, що автоматично модифікує SQL-запити, замінюючи у них потенційно небезпечні конструкції, не змінюючи при цьому їхньої логічної семантики. Основна мета цього модуля полягає у тому, щоб замість повного блокування запиту забезпечити його безпечне виконання у межах політик доступу. До типових механізмів переписування належать: заміна SELECT * на перелік дозволених колонок, видалення або корекція чутливих полів у SELECT-списку, додавання умов обмеження (наприклад, LIMIT), а також додавання службових фільтрів у запити без WHERE з метою запобігання повному скануванню всієї таблиці. У програмній реалізації це представлено класом SqlRewriter, який працює безпосередньо з абстрактним синтаксичним деревом (AST), отриманим після розбору SQL-парсером JSQlParser.

Для автоматичного переписування SQL у модулі застосовуються вбудовані механізми JSQlParser, які забезпечують повноцінну роботу з абстрактним синтаксичним деревом [15]. Зокрема, для аналізу та модифікації SELECT-запитів використовується метод Select.getSelectBody(), що дозволяє отримати основну структуру запиту, тоді як обробка списку вибраних колонок здійснюється через PlainSelect.getSelectItems() та PlainSelect.setSelectItems(), що дає змогу замінювати

конструкцію SELECT * на конкретні дозволені поля. Робота з умовами фільтрації реалізується через PlainSelect.getWhere() та PlainSelect.setWhere(), що забезпечує можливість додавати або змінювати умову WHERE. Аналогічно, доступ до операцій JOIN виконується через PlainSelect.getJoins() та PlainSelect.setJoins(). Для контролю обсягу повернутих даних може використовуватися об'єкт Limit разом із методом setLimit(), що дозволяє встановлювати обмеження на кількість рядків. Поглиблені трансформації AST виконуються завдяки механізмам шаблону відвідувача, зокрема ExpressionVisitor та SelectVisitor, які дозволяють знаходити й змінювати будь-які вузли дерева на довільному рівні вкладеності. За потреби прямого редагування структур таблиць або колонок використовуються методи Column.setColumnName() та Table.setName(), тоді як для вибіркової модифікації елементів SELECT-списку застосовується SelectItemVisitor. Завершальне формування оновленого SQL-коду забезпечує ExpressionDeParser, який будує коректний синтаксично узгоджений SQL-рядок на основі модифікованого AST без ризику порушення синтаксичної цілісності запиту.

Останнім компонентом є Audit & Logging, де кожна операція Policy Layer фіксується для подальшого моніторингу. Для цього існує клас AuditLogger, який веде історію виконаних запитів, заблокованих операцій та значень ризиків. Журнал аудиту може бути використаний для подальшої аналітики або інтеграції з SIEM-системами.

Фінальна діаграма класів наведена нижче (рис. 3).

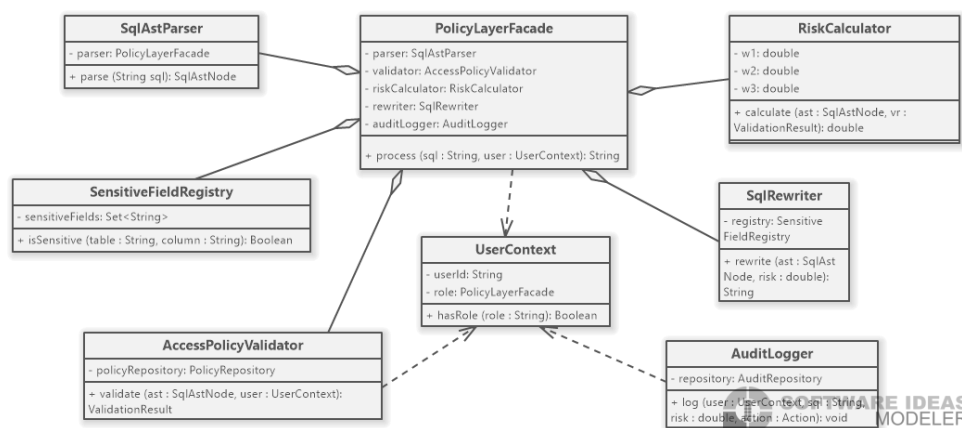


Рис. 3 – Фінальна діаграма класів для реалізації Policy Layer

Після побудови UML-діаграми та опису ключових компонентів запропонованої підсистеми, можна перейти до інтеграції отриманого сервісу, який являє собою Policy Layer, у типовий цикл обробки NL у SQL-запит. Базова схема роботи NL2SQL-рішень передбачає безпосередню передачу згенерованого LLM SQL-

виразу до СУБД, після чого результат повертається користувачу (рис. 1). У запропонованій архітектурі ця схема розширюється шляхом додавання окремого модуля – Policy Layer, який розміщується між застосунком і компонентом виконання SQL-запитів (рис. 4).

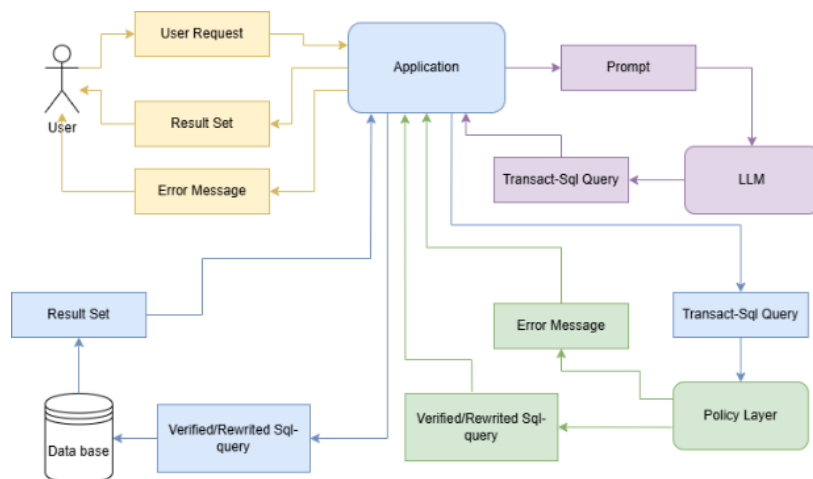


Рис. 4 – Архітектура системи NL2SQL із інтегрованим Policy Layer

У модифікованій архітектурі SQL-запит, сформований мовною моделлю, не надходить відразу до бази даних. Замість цього, застосунок перенаправляє його у Policy Layer, який згідно з визначеною UML-моделлю активує послідовність внутрішніх модулів: синтаксичний аналізатор, валідатор політик доступу, механізм оцінки ризику та, за потреби, модуль переписування. Кожний із цих компонентів виконує окрему частину загальної процедури контролю, що дозволяє формально встановити допустимість запиту для конкретного користувача. Варто відмітити, що інтеграція Policy Layer призводить до розгалуження виконання SQL-запиту. Якщо запит повністю відповідає політикам доступу і має низьке значення інтегрального ризику, він передається у СУБД без змін – фактично повторюючи поведінку первинної архітектури. У випадку помірного ризику Policy Layer активує Query Rewriter, який модифікує SQL таким чином, щоб усунути небезпечні або надлишкові елементи, але зберегти загальну семантику запиту. Таким чином, користувач отримує коректний і безпечний результат навіть у випадку недосконалого запиту, згенерованого LLM. Якщо ж оцінка ризику є високою або запит явно порушує політики, Policy Layer повертає у застосунок повідомлення про заборону виконання.

У результаті інтеграції Policy Layer вихідна архітектура NL2SQL-системи перетворюється з пасивної моделі «LLM → SQL → БД» на систему із розмежуванням допустимих запитів, запитів, що потребують автоматичного переписування, та запитів, які підлягають блокуванню. Це дозволяє поєднати гнучкість роботи з мовними моделями із формальними вимогами безпеки, підвищуючи надійність інтеграції LLM у корпоративні інформаційні системи.

природної мови у SQL-запити. Аналіз показав, що більшість існуючих рішень орієнтуються переважно на підвищення точності генерації SQL-запитів, оптимізацію in-context навчання, покращення семантичної відповідності або адаптацію промптів та навчальних наборів для різних рівнів складності запитів. Водночас майже всі роботи не враховують етап контролю доступу: роль користувача, корпоративні політики безпеки, обмеження на чутливі атрибути та запобігання можливим ризикам витоку даних. Такий недолік є критичним для практичного використання NL2SQL-рішень у корпоративних середовищах.

Для усунення виявленої проблеми було запропоновано нову архітектуру NL2SQL-системи з інтегрованим Policy Layer – окремим проміжним сервісом, що виконує синтаксичний аналіз згенерованого SQL-запиту, перевірку політик доступу, виявлення чутливих полів, оцінку ризику та можливе автоматичне переписування запиту. Запити, що не відповідають політикам безпеки або мають високий рівень ризику, блокуються ще до етапу виконання в СУБД. Таким чином, запропоноване рішення забезпечує керований і захищений механізм виконання SQL-запитів, генерованих мовними моделями, та усуває ключовий недолік наявних підходів.

Отримані результати підтверджують актуальність розробки Policy Layer як обов'язкового компонента сучасних NL2SQL-систем і відкривають перспективні напрями подальших досліджень: удосконалення механізмів переписування SQL-запитів, адаптивне налаштування вагових коефіцієнтів ризику, а також інтеграція багаторівневих політик доступу, що враховують контекст користувача й історію виконання запитів.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано сучасні наукові та прикладні роботи, присвячені проблемам автоматизованого перетворення

Перелік використаних джерел

- [1] Review of question answering technology based on Text to SQL / Z. Ning et al. 2021 *IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA)*, Shenyang, China, 22–24 January

2021. Pp. 143–146. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPECA51329.2021.9362554>
- [2] Natural Language to SQL Queries: A Review / M. S. Baig et al. *International Journal of Innovations in Science & Technology*. 2022. Vol. 4, no. 1. Pp. 147–162.
- [3] HITSQL: Human-In-The-Loop Techniques for Enhancing Text-to-SQL Query Generation with Large Language Models / D. Al-Turki et al. 2025 *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Rome, Italy, 30 June 2025 - 05 July 2025. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN64981.2025.11227910>.
- [4] AID-SQL: Adaptive In-Context Learning of Text-to-SQL with Difficulty-Aware Instruction and Retrieval-Augmented Generation / X. Li et al. 2025 *IEEE 41st International Conference on Data Engineering (ICDE)*, Hong Kong, Hong Kong, 19–23 May 2025. Pp. 3945–3957. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDE65448.2025.00294>.
- [5] Chen Y.-X., Huang M.-J., Chen H.-K. A Closed-Domain Natural Language Database Query System by LLMs. 2025 *Seventh International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung, Taiwan, 27–30 June 2025. Pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/IS3C65361.2025.11131102>.
- [6] How to Safely Use LLMs for Text-to-SQL with Stored Procedures. Medium. URL: <https://erincon01.medium.com/how-to-safely-use-llms-for-text-to-sql-with-stored-procedures-ba7540067f5f> (дата звернення: 29.11.2025).
- [7] Cognitive mirage: A Review of Hallucinations in Large Language Models / H. Ye et al. arXiv preprint. arXiv:2309.06794, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.06794>.
- [8] NL2SQL System Design Guide 2025. Medium. URL: <https://medium.com/@adityamahakali/nl2sql-system-design-guide-2025-c517a00ae34d> (дата звернення: 29.11.2025).
- [9] Naidu Gundapaneni M. Security Practices in Database Access: A Technical Review. *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Vol. 7, no. 8. Pp. 771–778. DOI: <https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.8.90>.
- [10] Khamdamov R. K., Kerimov K. F. Database protection based on web application firewall. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2021. Vol. 1. Pp. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.34229/0572-2691-2021-1-7>.
- [11] Botros S., Tinley J. High Performance MySQL. O'Reilly Media, Incorporated, 2021. 365 p.
- [12] Sierra K. Head First Design Patterns. O'Reilly Media, Incorporated, 2004. 692 p.
- [13] Java SQL Parser Library. URL: <https://jsql-parser.github.io/JSqlParser/> (дата звернення: 29.11.2025).
- [14] What is YAML? Understanding the Basics, Syntax, and Use Cases. DataCamp. URL: <https://www.data-camp.com/blog/what-is-yaml> (дата звернення: 29.11.2025).
- [15] Parse database query with JSQl Parser. Medium. URL: <https://medium.com/@knoldus/parse-database-query-with-jsql-parser-16c708270433> (дата звернення: 29.11.2025).

INTEGRATION OF A POLICY LAYER INTO NL2SQL SYSTEMS TO PREVENT UNAUTHORIZED ACCESS TO SENSITIVE DATA

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 ;
Novoselova A.S.	Master's degree candidate, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2854-5569 , e-mail: anastasiia.novoselova@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

The article addresses the critical problem of the lack of robust access-control mechanisms in modern Natural Language to SQL (NL2SQL) systems. While these systems, powered by Large Language Models (LLMs), have demonstrated significant progress in the accuracy and efficiency of transforming natural language queries into syntactically and semantically correct SQL commands, they predominantly focus on linguistic quality and often fail to account for the security context. This critical oversight includes neglecting risks associated with user roles, defined corporate access policies, and the inherent sensitivity of the data attributes being queried. Consequently, a syntactically correct query, such as one requesting employee salaries, can inadvertently expose confidential corporate information if the user lacks the necessary permissions, posing a significant threat to data security. Existing research efforts primarily concentrate on enhancing LLM generation quality, optimizing training datasets, or attempting to «train» the stochastic LLM to generate «safe» queries, an approach that is inherently unreliable due to the non-deterministic nature and potential for «hallucinations» in LLMs. To mitigate these inherent security risks, an enhanced NL2SQL system architecture with an integrated Policy Layer is

proposed. This Policy Layer is designed as an independent, intermediate service positioned between the application and the database management system, ensuring a deterministic control mechanism. The core functionality of this layer involves a sequential, formal process utilizing the generated SQL query as input: 1) Syntactic Parsing using tools like JSQlParser to convert the SQL into an Abstract Syntax Tree (AST); 2) Access Policy Validation by comparing the AST against pre-defined corporate policies (e.g., stored in YAML files) that map user roles to permitted tables and columns; 3) Sensitive Field Detection to flag the presence of high-sensitivity columns (e.g., salary, home_address); 4) Risk Evaluation; 5) Query Rewriting or Blocking. Based on the calculated risk score and policy validation results, the Policy Layer can either automatically modify the SQL query (e.g., replacing SELECT * with allowed columns, adding LIMIT clauses) via the Query Rewriter module to bring it into compliance, or it can outright block execution if the risk is high or critical policies are violated. This architecture transforms the NL2SQL workflow into a controlled system that provides formal, guaranteed policy adherence, reconciling the flexibility of LLM usage with strict corporate security requirements.

Keywords: NL2SQL; LLM; large language model; SQL; Policy Layer; risk assessment.

References

- [1] Z. Ning, D. Zhang, L. Zhang, H. Yu, and F. Wan, "Review of question answering technology based on Text to SQL," in *Proc. of the 2021 IEEE Int. Conf. on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA)*, Shenyang, China, January 22–24, 2021, pp. 143–146. doi: **10.1109/ICPECA51329.2021.9362554**.
- [2] M. S. Baig, A. Imran, A. U. Yasin, A. H. Butt, and M. I. Khan, "Natural Language to SQL Queries: A Review," *International Journal of Innovations in Science & Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 147–162, 2022.
- [3] D. Al-Turki, S. Basurra, M. Gaber, B. Attasi, and M. M. Abdelsamea, "HITSQL: Human-In-The-Loop Techniques for Enhancing Text-to-SQL Query Generation with Large Language Models," in *Proc. of the 2025 Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN)*, Rome, Italy, 30 June 2025 - 05 July 2025, pp. 1–8. doi: **10.1109/IJCNN64981.2025.11227910**.
- [4] X. Li, Q. Cai, Y. Shu, C. Guo, and B. Yang, "AID-SQL: Adaptive In-Context Learning of Text-to-SQL with Difficulty-Aware Instruction and Retrieval-Augmented Generation," in *Proc. of the 2025 IEEE 41st Int. Conf. on Data Engineering (ICDE)*, Hong Kong, Hong Kong, May 19–23, 2025, pp. 3945–3957. doi: **10.1109/ICDE65448.2025.00294**.
- [5] Y.-X. Chen, M.-J. Huang, and H.-K. Chen, "A Closed-Domain Natural Language Database Query System by LLMs," in *Proc. of the 2025 Seventh Int. Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung, Taiwan, June 27–30, 2025, pp. 1–3. doi: **10.1109/IS3C65361.2025.11131102**.
- [6] "How to Safely Use LLMs for Text-to-SQL with Stored Procedures," *Medium*. [Online]. Available: <https://erincon01.medium.com/how-to-safely-use-llms-for-text-to-sql-with-stored-procedures-ba7540067f5f>. Accessed on: Nov. 29, 2025.
- [7] H. Ye, T. Liu, A. Zhang, W. Hua, and W. Jia, "Cognitive mirage: A Review of Hallucinations in Large Language Models," *arXiv:2309.06794*, 2023. doi: **10.48550/arXiv.2309.06794**.
- [8] "NL2SQL System Design Guide 2025," *Medium*. [Online]. Available: <https://medium.com/@adityamahakali/nl2sql-system-design-guide-2025-c517a00ae34d>. Accessed on: Nov. 29, 2025.
- [9] M. Naidu Gundapaneni, "Security Practices in Database Access: A Technical Review," *Journal of Computer Science and Technology Studies*, vol. 7, no. 8, pp. 771–778, 2025. doi: **10.32996/jcsts.2025.7.8.90**.
- [10] R. K. Khamdamov, and K. F. Kerimov, "Database protection based on web application firewall," *J Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 1, pp. 84–90, 2021. doi: <https://doi.org/10.34229/0572-2691-2021-1-7>.
- [11] S. Botros, and J. Tinley, *High Performance MySQL*. O'Reilly Media, Incorporated, 2021.
- [12] K. Sierra, *Head First Design Patterns*. O'Reilly Media, Incorporated, 2004.
- [13] "Java SQL Parser Library," *GitHub*. [Online]. Available: <https://jsqlparser.github.io/JSQlParser/>. Accessed on: Nov. 29, 2025.
- [14] "What is YAML? Understanding the Basics, Syntax, and Use Cases," *DataCamp*. [Online]. Available: <https://www.datacamp.com/blog/what-is-yaml>. Accessed on: Nov. 29, 2025.
- [15] "Parse database query with JSQl Parser," *Medium*. [Online]. Available: <https://medium.com/@knoldus/parse-database-query-with-jsql-parser-16c708270433>. Accessed on: Nov. 29, 2025.

Стаття надійшла 19.12.2025

Стаття прийнята 15.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Морозова А. І., Новоселова А. С., Петрова Р. В. Інтеграція Policy Layer у NL2SQL-системи для запобігання доступу до чутливих даних. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 1. С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359767>.

ГРАФІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ТРАЄКТОРІЙ НЕПЕРЕРВНИХ
ДИСИПАТИВНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Лупаренко О.В.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»,
м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3005-0531>, e-mail:
luparenko_e_v@pstu.edu

У роботі розглядається задача якісного дослідження складної динаміки неперервних дисипативних систем, для яких аналітичний аналіз глобальної поведінки траєкторій є ускладненим. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю ефективних інструментів візуального аналізу фазової структури тривимірних нелінійних систем, що застосовуються в природничих науках, інженерії та прикладній математиці. Метою роботи є систематизація та програмна реалізація комплексу графічних методів дослідження фазових траєкторій дисипативних динамічних систем у середовищі MATLAB та оцінка їх інформативності для ідентифікації типів динамічних режимів. У дослідженні використано чисельне інтегрування автономних систем звичайних диференціальних рівнянь першого порядку та сукупність графічних методів, зокрема побудову фазових портретів, перетинів Пуанкаре, карт повернення, рекурентних діаграм і візуалізацію особливих точок. Розроблений інтегрований програмний комплекс із графічним інтерфейсом забезпечує проведення чисельного експерименту та узгоджене отримання фазових індикаторів. Показано, що комплексне застосування цих засобів забезпечує наочне виявлення стаціонарних, періодичних і хаотичних режимів руху, дозволяє встановлювати структуру атракторів, характер їхньої геометрії та особливості переходів між режимами. Результати продемонстровано на прикладі класичних моделей Лоренца та Росслера. Наукова новизна полягає в узагальненні та інтеграції графічних методів фазового аналізу в єдиному програмному середовищі з можливістю паралельної інтерпретації різних візуальних індикаторів динаміки. Практична значущість роботи визначається можливістю використання розробленого підходу для дослідження широкого класу нелінійних моделей та підвищенням відтворюваності обчислювальних експериментів. Подальші дослідження пов'язані з поєднанням візуальних методів із кількісними характеристиками хаотичної динаміки, зокрема ентропійними показниками та показниками стійкості.

Ключові слова: дисипативна динамічна система; фазовий простір; фазові траєкторії; графічні методи аналізу; перетин Пуанкаре; карта повернення; рекурентний аналіз; хаотичний атрактор; нелінійна динаміка; MATLAB.

Постановка проблеми

Сучасні дослідження нелінійних динамічних систем демонструють, що навіть відносно прості математичні моделі можуть породжувати складну просторово-часову поведінку, включаючи біфуркаційні переходи, мультистабільність і хаотичну динаміку. Для тривимірних автономних систем звичайних диференціальних рівнянь, що описують дисипативні процеси, глобальний аналіз структури фазового простору у більшості випадків є аналітично недосяжним. Це зумовлює необхідність використання чисельних та графічних методів, здатних відобразити геометричну організацію траєкторій і характер інваріантних множин.

Дисипативні динамічні системи характеризуються стисканням фазового об'єму та формуванням атракторів різної природи – регулярних (стаціонарних, періодичних) або хаотичних. Виявлення типу режиму руху, структури атрактора та особливостей переходів між режимами є складною задачею, оскільки класичні аналітичні методи забезпечують переважно локальну інформацію про поведінку поблизу стаціонарних точок і не дають повної картини глобальної динаміки.

Проблема полягає у відсутності узгодженого інструментального підходу, який дозволяв би в єдиному середовищі поєднувати різні графічні засоби аналізу – фазові портрети, перетини Пуанкаре, карти повернення, рекурентні діаграми – та інтерпретувати їх результати як взаємодоповнювальні характеристики

динамічного режиму. Незважаючи на поширеність кожного з методів окремо, їх комплексне застосування часто носить фрагментарний характер і не має систематизованої реалізації.

Окремим аспектом розглядуваної проблеми є її інструментальна реалізація. Хоча середовище MATLAB містить розвинені засоби чисельного інтегрування та базової візуалізації результатів, його стандартні функції орієнтовані переважно на побудову окремих графіків і не забезпечують комплексної підтримки методів фазового аналізу. Реалізація перетинів Пуанкаре, карт повернення та рекурентних діаграм потребує додаткової обробки часових рядів, контролю напрямку перетину площин, узгодження вибірок і спеціалізованих алгоритмів обчислення відстаней між станами системи. У типовій практиці ці процедури виконуються за допомогою розрізнених скриптів, що ускладнює відтворюваність досліджень і цілісну інтерпретацію результатів. Це зумовлює необхідність створення інтегрованого програмного комплексу, який поєднує чисельне моделювання з систематизованими графічними індикаторами динамічних режимів.

Предметом дослідження є графічні методи аналізу фазових траєкторій неперервних дисипативних динамічних систем у тривимірному фазовому просторі. Основними аспектами дослідження виступають візуалізація глобальної структури траєкторій, зниження розмірності динаміки за допомогою перетинів

Пуанкаре, дослідження взаємозв'язків між послідовними станами через карти повернення та аналіз повторюваності станів за допомогою рекурентних діаграм.

Значущість розв'язання цієї проблеми полягає в розширенні можливостей якісного аналізу складних нелінійних моделей, що застосовуються у фізиці, технічних системах, біології та інших галузях, де хаотичні режими мають прикладне значення. Формалізація та інтеграція графічних методів сприяє підвищенню надійності інтерпретації чисельних експериментів і дозволяє більш обґрунтовано ідентифікувати типи динамічних режимів.

У межах цієї роботи дослідження спрямоване на вирішення таких питань:

- які графічні індикатори є найбільш інформативними для розрізнення регулярних і хаотичних режимів;

- як узгоджуються результати різних графічних методів між собою;

- якою мірою інтеграція цих методів у єдиному програмному середовищі підвищує ефективність фазового аналізу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження неперервних дисипативних динамічних систем у сучасній нелінійній динаміці спираються на поєднання якісної теорії та чисельно-графічних методів, що дозволяють отримувати інтерпретовані уявлення про складну поведінку систем у фазовому просторі. Базові уявлення про хаотичну динаміку, структуру фазових портретів, аттрактори та чутливість до початкових умов систематизовано у фундаментальних працях, які й надалі визначають методологічні підходи до аналізу нелінійних систем [1, 2]. Для задач параметричного аналізу та дослідження сценаріїв переходу між режимами важливе місце посідає прикладна теорія біфуркацій, у межах якої сформульовано універсальні механізми виникнення складної динаміки та розроблено інструменти їх дослідження [3].

Упродовж останніх 10–20 років значного розвитку набули графічні методи, орієнтовані на редукцію розмірності та геометричну інтерпретацію динаміки. Зокрема, перерізи Пуанкаре та карти повернення залишаються ефективними засобами аналізу періодичних, квазіперіодичних і хаотичних режимів. Разом із тим показано, що для нетривіальних класів моделей, зокрема систем із розривністю або дробовими похідними, побудова коректного відображення Пуанкаре потребує спеціальних чисельних процедур і ретельного контролю моментів перетину фазової траєкторії з обраною секцією [4]. Це підкреслює, що графічний аналіз не зводиться до побудови окремих ілюстрацій, а вимагає комплексних алгоритмічних рішень та спеціалізованого програмного інструментарію.

Вагомий розвиток у сучасних дослідженнях отримав рекурентний аналіз як інструмент виявлення геометричної структури фазових траєкторій.

Запропоновані раніше рекурентні діаграми [5] стали основою для формування методів Recurrence Quantification Analysis (RQA), які дозволяють кількісно характеризувати складність динаміки та фіксувати зміни режимів [6]. Узагальнюючі огляди рекурентного аналізу систематизують його теоретичні засади, варіанти реалізації та прикладні можливості для широкого класу складних систем [7]. Водночас у низці робіт досліджено вплив шумів спостереження на рекурентні характеристики, що є принципово важливим для коректного застосування цих методів у чисельних і експериментальних дослідженнях [8]. Новітні публікації також зосереджені на вдосконаленні вибору параметрів рекурентного аналізу та підвищенні відтворюваності результатів [9].

Паралельно з рекурентними підходами активно розвиваються геометрично-структурні методи, що поєднують фазовий аналіз із інструментами теорії складних мереж. Показано, що мережеві подання часових рядів можуть розглядатися як доповнення до класичних графічних методів і надавати додаткові структурні ознаки динамічних режимів [10]. Такі підходи розширюють можливості інтерпретації результатів та зменшують залежність висновків від суто візуального аналізу окремих графічних образів.

Важливим напрямом сучасних досліджень є розвиток програмних комплексів і бібліотек, що інтегрують чисельне моделювання з обчисленням геометричних і кількісних індикаторів. Для аналізу часових рядів і рекурентно-мережевих методів створено спеціалізовані програмні засоби, які забезпечують комплексний підхід до дослідження нелінійної динаміки [11]. Для задач хаосу й аналізу фазових траєкторій також використовуються сучасні бібліотеки, орієнтовані на відтворювані обчислення індикаторів динамічної складності [12]. У середовищі MATLAB розроблено ефективні інструменти для чисельного аналізу біфуркацій і continuation-методів, які дозволяють досліджувати параметричні переходи у складних моделях [13, 14].

Разом із тим аналіз літератури свідчить, що на практиці реалізація графічних методів дослідження нелінійної динаміки часто має фрагментарний характер. Існуючі програмні рішення зазвичай орієнтовані на окремі класи задач або потребують значних зусиль для інтеграції різних інструментів. Попри те, що MATLAB залишається стандартним середовищем для інженерних і наукових розрахунків, його вбудовані засоби не забезпечують єдиного інтегрованого інструменту для систематизованого візуального аналізу нелінійної динаміки. У результаті існуючі підходи не забезпечують узгодженої та відтворюваної реалізації повного набору графічних індикаторів у межах одного середовища.

Українські публікації з цієї тематики представлені переважно методичними й прикладними роботами, які підтверджують практичну релевантність рекурентних і графічних підходів до аналізу часових рядів [15]. Водночас вони не усувають проблему

комплексної інтеграції графічних методів у межах одного інструментального середовища.

Чисельні методи дослідження динамічних систем цього класу, зокрема питання інтегрування систем диференціальних рівнянь та оцінювання точності отриманих розв'язків, розглянуто авторами в попередній роботі [16]. Поточна стаття є логічним продовженням цього дослідження і присвячена графічним методам фазового аналізу, які у поєднанні з чисельними підходами забезпечують більш повне вивчення властивостей динамічних систем.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що графічні методи та геометричні характеристики фазової динаміки є добре розробленими на теоретичному рівні та активно застосовуються в сучасних дослідженнях. Водночас недостатньо систематизованим залишається питання їх узгодженої реалізації та використання в єдиному програмному комплексі, орієнтованому на швидкий і відтворюваний візуальний аналіз у середовищі MATLAB, що й визначає актуальність і спрямованість даної роботи.

Мета статті

Метою роботи є систематизація та програмна реалізація комплексу графічних методів дослідження фазових траєкторій неперервних дисипативних динамічних систем у середовищі MATLAB та аналіз їх інформативності для ідентифікації типів динамічних режимів.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є нелінійні неперервні дисипативні динамічні системи, математична модель яких у загальному вигляді описується системою трьох автономних звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f_1(x, y, z) \\ \frac{dy}{dt} = f_2(x, y, z), \\ \frac{dz}{dt} = f_3(x, y, z) \end{cases}$$

де x, y, z – змінні стану, що визначають положення точки у фазовому просторі R^3 , t – час, f_1, f_2, f_3 – неперервно-диференційовані нелінійні функції. Дисипативність досліджуваних систем визначається від'ємною дивергенцією векторного поля $\text{div} F < 0$, що зумовлює експоненціальне стиснення фазового об'єму; за наявності обмежених траєкторій це приводить до формування інваріантної граничної множини (атрактора). Поведінка таких систем характеризується наявністю стаціонарних, періодичних та хаотичних режимів.

Предметом дослідження є методи графічного аналізу фазових траєкторій і динамічних режимів, а також алгоритми їх систематизованої програмної реалізації

для візуальної діагностики та інтерпретації результатів чисельного моделювання.

Дослідження базується на чисельному моделюванні динамічних систем у середовищі MATLAB. Для отримання часових реалізацій фазових траєкторій використовувалися стандартні методи інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь. Обчислення виконувалися із застосуванням вбудованих солверів сімейства Runge–Kutta: інтегратора *ode45* для нежорстких систем та солвера *ode15s* для жорстких моделей з адаптивним кроком. У результаті інтегрування формувалися масиви фазових координат, що описують еволюцію системи у фазовому просторі для різних початкових умов і значень параметрів.

Отримані часові реалізації використовувалися як вихідні дані для подальшого геометричного аналізу. На їх основі виконувалася побудова фазових портретів у дво- та тривимірному просторі станів, що дозволяло дослідити структуру атракторів, локалізувати області притягання та виявити характер руху. Для зменшення розмірності задачі та аналізу внутрішньої структури траєкторій формувалися перерізи Пуанкаре та карти повернення, які відображають взаємозв'язок між послідовними станами системи.

Визначення точок перетину фазової траєкторії із заданою січною гіперплощиною здійснювалося із застосуванням механізму Events вбудованих функцій інтегрування MATLAB, що дозволяє точно фіксувати моменти досягнення заданих умов без порушення чисельної точності інтегрування. Це забезпечувало коректність побудови перерізів Пуанкаре та пов'язаних з ними карт повернення.

Для аналізу повторюваності станів системи застосовувався рекурентний аналіз. На основі часових реалізацій будувалися рекурентні діаграми, що відображають близькість станів у різні моменти часу. Перед побудовою виконувалося нормування даних і вибір параметрів вкладення, що дозволяло коректно відтворити геометрію фазового простору та уникнути спотворення структури діаграми. Порогове значення ε , що визначає максимальну відстань між станами, при якій вони вважаються рекурентними, обирається автоматично засобами MATLAB на основі статистичних характеристик нормованого часового ряду, що забезпечує адаптивність методу до масштабу конкретної траєкторії.

З метою узгодженого застосування всіх перелічених процедур розроблено інтегрований програмний комплекс у середовищі MATLAB, який автоматизує побудову фазових індикаторів динаміки та забезпечує узгоджене отримання геометричних характеристик для одного чисельного розв'язку: фазових портретів, перерізів Пуанкаре, карт повернення, рекурентних діаграм, а також визначення особливих точок і їх характеристик. Варіювання параметрів моделі здійснюється у процесі чисельного експерименту, що дозволяє досліджувати перебудову динамічних режимів. Програмний комплекс також містить інструмент побудови

біфуркаційних діаграм, детальне дослідження яких виходить за межі даної роботи та є предметом подальших досліджень. Інтеграція обчислювальних і аналітичних процедур підвищує узгодженість обчислень та відтворюваність отриманих результатів.

Приклад використання програмного комплексу наведено на рис. 1. За результатами одного чисельного інтегрування автоматично формуються фазовий портрет, переріз Пуанкаре та часові реалізації, що забезпечує цілісний аналіз динамічного режиму.

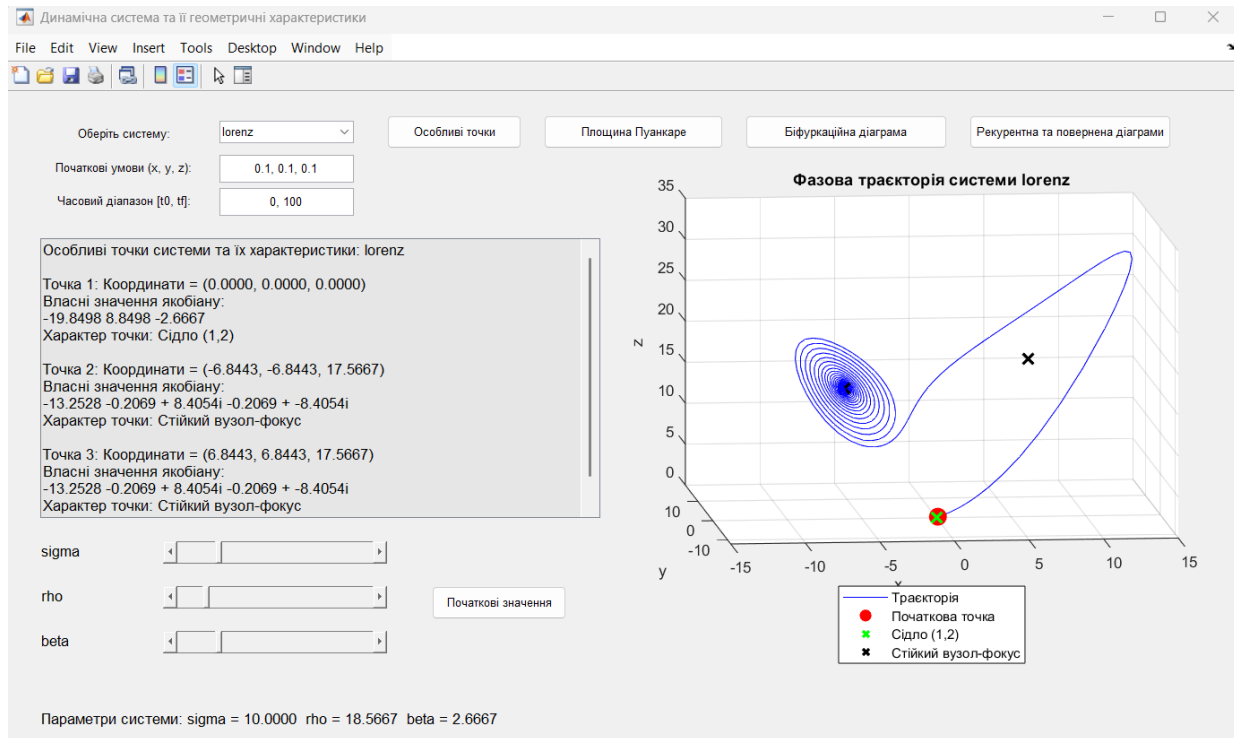


Рис. 1 – Структура обчислювального експерименту та візуалізація фазових індикаторів

Виклад основного матеріалу

У межах проведеного дослідження аналіз динамічної поведінки неперервних дисипативних систем здійснюється із застосуванням графічних методів фазового аналізу. Їх використання дозволяє дослідити структуру фазових траєкторій, встановити тип динамічного режиму та виявити геометричні особливості інваріантних множин, які складно визначити аналітичними методами.

Для ілюстрації властивостей дисипативних динамічних систем подальший аналіз проводиться на двох класичних моделях – системах Лоренца та Росслера.

Дослідження проводиться шляхом зміни керуючих параметрів і аналізу особливих точок систем. Для кожної моделі будуються фазові портрети, перерізи Пуанкаре, карти повернення та рекурентні діаграми, які використовуються як взаємодоповнювальні індикатори режиму руху.

Першою досліджується система Лоренца, що є однією з базових моделей хаотичної динаміки. Вона описується системою нелінійних звичайних диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} = x(r - z) - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases}$$

де $\sigma, b, r > 0$ – параметри системи, що визначають характер її динамічної поведінки.

Дивергенція системи Лоренца $\text{div} F = \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial f_2}{\partial y} + \frac{\partial f_3}{\partial z} = -(\sigma + 1 + b) < 0$ у всій області визначення, отже, фазовий об'єм у системі зменшується експоненціально з часом, що свідчить про її дисипативний характер і пояснює існування обмеженої інваріантної множини – атрактора, до якого прямують траєкторії з широкого класу початкових умов.

За різних значень параметра r при $\sigma = 10, b = 8/3$ система Лоренца демонструє зміну режимів руху: від збіжності траєкторій до стійкої особливості до періодичних коливань і подальшого виникнення хаотичної поведінки. Так, при малих значеннях (наприклад, $r = 5$) траєкторії сходяться до однієї стійкої особливості (рис. 2). Фазовий портрет демонструє асимптотичну збіжність усіх траєкторій до

єдиної точки рівноваги, що відповідає режиму стійкого стаціонарного стану. Відсутність замкнених орбіт і розсіювання траєкторій у фазовому просторі підтверджує відсутність автоколивань у системі за даних параметрів.

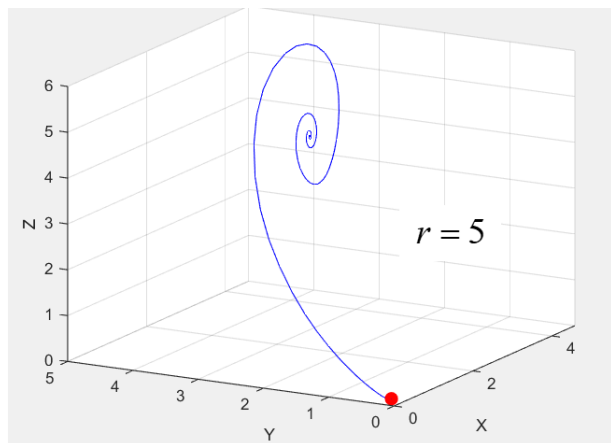


Рис. 2 – Фазовий портрет системи Лоренца при $r = 5$

Таким чином, при малих значеннях параметра r система повністю втрачає динамічну активність і вироджується у стаціонарний режим. Збільшення r призводить до якісної зміни поведінки – виникнення стійких коливань.

У випадку $r = 15$ система демонструє періодичну поведінку з замкненою орбітою (рис. 3). На фазовому портреті формується граничний цикл, що відповідає періодичному режиму руху. Траєкторії з різних початкових умов притягуються до єдиної замкненої орбіти, що свідчить про існування єдиного періодичного атратора. Отримана замкнена орбіта є стійкою – на відміну від нестійких рівноваг, вона зберігає свою форму при малих збуреннях початкових умов, що підтверджує усталеність коливального режиму за даних параметрів.

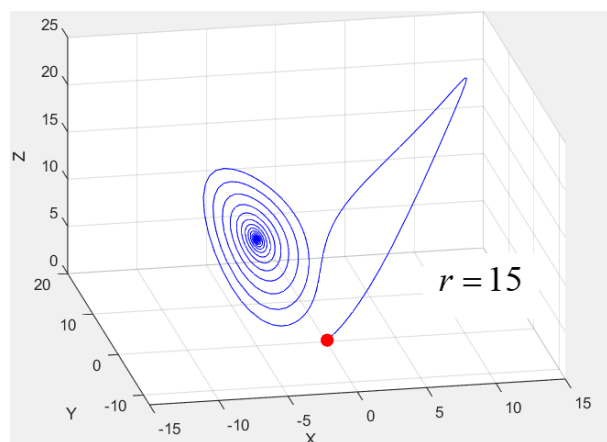


Рис. 3 – Фазовий портрет системи Лоренца при $r = 15$

При $r = 28$ виникає відомий хаотичний атрaktor Лоренца, що має вигляд двох «крил», між якими траєкторія аперіодично перемикається. Відсутність самоперетинів зумовлена єдиністю розв'язку автономної системи диференціальних рівнянь, тоді як хаотичність проявляється у чутливості до початкових умов і фрактальній структурі інваріантної множини (рис. 4).

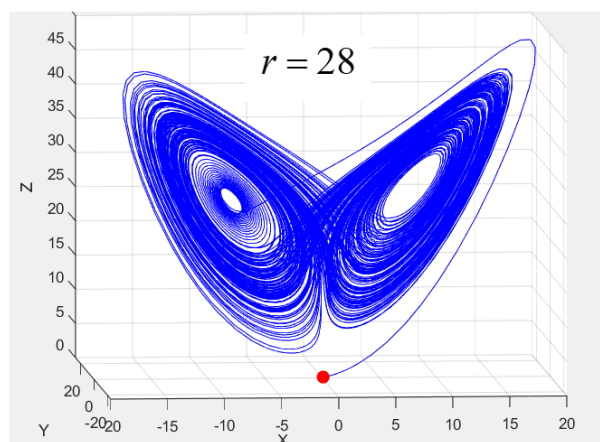


Рис. 4 – Фазовий портрет системи Лоренца при $r = 28$

Для пояснення механізму виникнення складної динаміки досліджено особливі точки системи Лоренца, які визначаються з умов стаціонарності

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} = \frac{dz}{dt} = 0.$$

Розв'язання відповідної системи алгебраїчних рівнянь дає одну центральну точку рівноваги $O(0,0,0)$ та дві симетричні точки $C_{1,2}(\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r-1)$.

Рівноваги C_1 і C_2 існують лише при $r > 1$, коли вираз $b(r-1)$ є додатнім; при $r \leq 1$ система має єдину стаціонарну точку O . Розроблений програмний комплекс автоматично визначає кількість стаціонарних точок залежно від значень параметрів і виводить відповідне повідомлення у разі їх відсутності або неповного набору. Тип рівноваг визначається за власними значеннями матриці Якобі системи. Центральна точка O є сідлом, тоді як дві симетричні точки C_1 і C_2 при $r > 1$ втрачають стійкість і стають сідло-фокусами (рис. 5). Власні значення матриці Якобі мають додатну дійсну частину, що визначає нестійкість рівноваг. Тому траєкторії не прямують до стаціонарного стану, а відштовхуються від околу рівноваг, що створює механізм формування атратора.

Особливі точки системи та їх характеристики: *logenz*

Точка 1: Координати = (0.0000, 0.0000, 0.0000)

Власні значення якобіану:

-22.8277 11.8277 -2.6667

Характер точки: Сідло (1,2)

Точка 2: Координати = (-8.4853, -8.4853, 27.0000)

Власні значення якобіану:

-13.8546 0.0940 + 10.1945i 0.0940 + -10.1945i

Характер точки: Сідло-фокус (2,1)

Точка 3: Координати = (8.4853, 8.4853, 27.0000)

Власні значення якобіану:

-13.8546 0.0940 + 10.1945i 0.0940 + -10.1945i

Характер точки: Сідло-фокус (2,1)

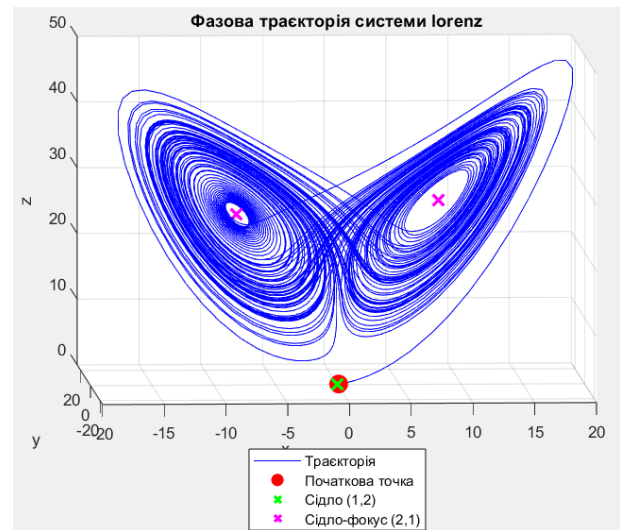
Рис. 5 – Характеристика особливих точок системи Лоренца при $r = 28$

Нестійкість цих рівноваг призводить до того, що фазові траєкторії не можуть збігатися до жодної з них і змушені переміщатися між околами точок C_1 та C_2 , що і формує характерну дволопатеву структуру атратора Лоренца. Розташування особливих точок системи у фазовому просторі наведено на рис. 6.

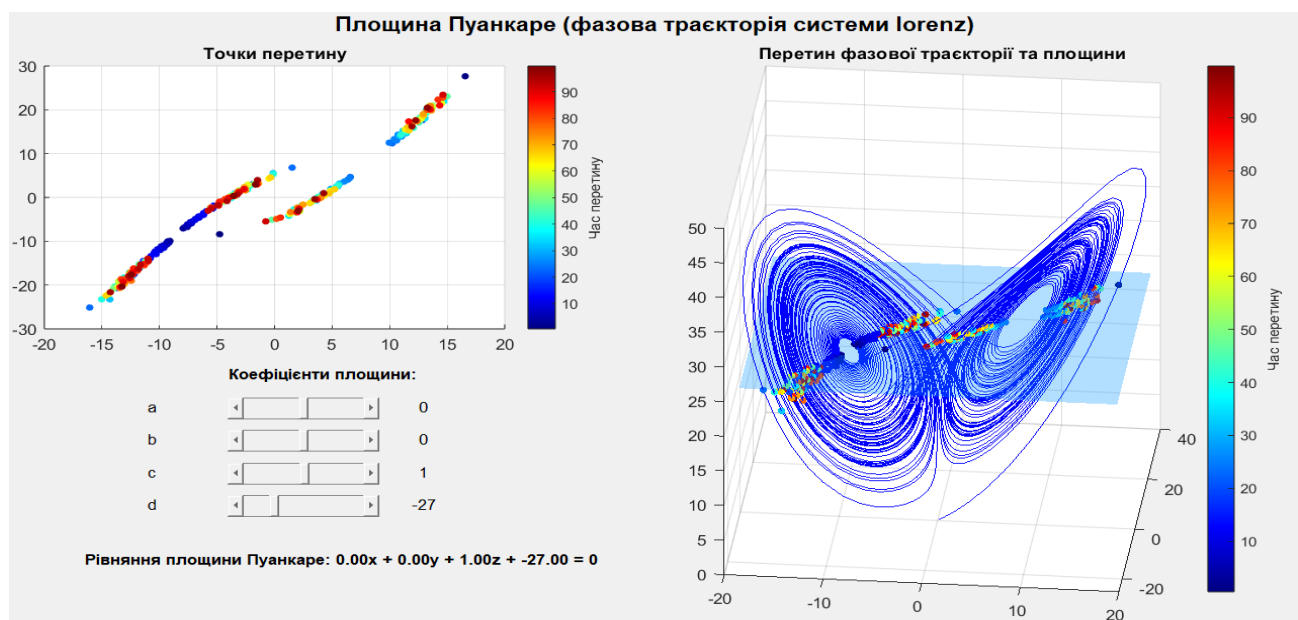
Симетричне розташування рівноваг відносно центральної області визначає дволопатеву геометрію атратора: траєкторія поперемінно перебуває в околі кожної з нестійких рівноваг, здійснюючи переходи між ними.

Для подальшого дослідження структури фазових траєкторій використано переріз Пуанкаре, що дозволяє

перейти від неперервної траєкторії до дискретної множини точок та дослідити її внутрішню організацію.

Рис. 6 – Особливі точки системи Лоренца при $r = 28$

У системі Лоренца як площину перерізу обрано $z = r - 1$, причому враховувалися лише перетини, що відбуваються в одному напрямку руху траєкторії, наприклад, коли $\frac{dz}{dt} > 0$ (рис. 7). Множина точок не зводиться до скінченного набору або замкненої кривої, а формує складну розширену структуру. Це відповідає аперіодичному режиму, що підтверджує наявність дивного атратора.

Рис. 7 – Переріз Пуанкаре для системи Лоренца при $r = 28$ площиною $z = r - 1 = 27$

У результаті кожній фазовій траєкторії відповідає послідовність точок на площині, яка відображає характер динамічного режиму.

На основі послідовності точок перетину побудовано карту повернення (рис. 8), у якій кожному значенню координати x_n відповідає наступне значення x_{n+1} . Відображення має нерегулярну залежність без утворення стабільної фіксованої точки або скінченного циклу, що відповідає відсутності періодичності. Розсіювання точок відображає сильну залежність наступного стану від попереднього.

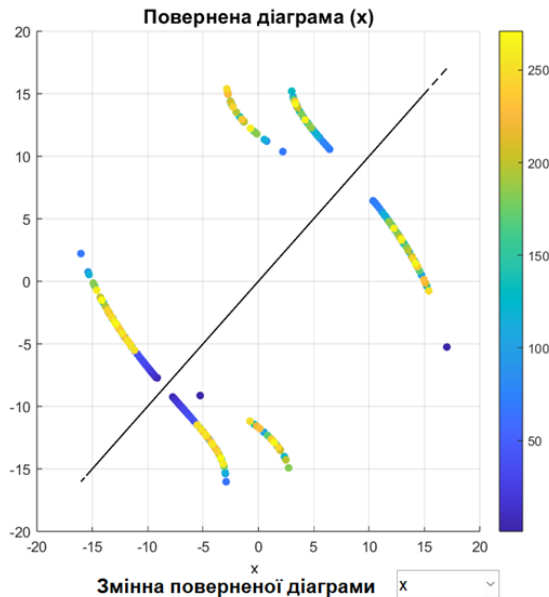


Рис. 8 – Карта повернення для проекції фазової траєкторії системи Лоренца при $r = 28$

Таким чином, неперервна динаміка системи зводиться до дискретного відображення на площині Пуанкаре. Для періодичного руху точки карти повернення утворюють скінченну множину або замкнену криву; у хаотичному режимі вони заповнюють нерегулярну область із фрактальною структурою. В отриманому випадку точки розподілені нерівномірно без вираженої структури, а близькі значення координати x_n можуть відповідати суттєво різним x_{n+1} – що є прямим індикатором чутливості до початкових умов.

Для дослідження повторюваності станів системи побудовано рекурентну діаграму на основі часової реалізації фазової траєкторії (рис. 9).

Рекурентна діаграма являє собою матрицю точок, кожна з яких відповідає парі моментів часу, у яких система перебуває у близьких станах фазового простору. Її структура відображає внутрішню організацію динамічного процесу.

Для регулярних режимів на діаграмі спостерігаються довгі діагональні лінії, що відповідають періодичності руху. У досліджуваному випадку діаграма має фрагментарний вигляд: присутні короткі

діагональні структури та їх фрагментація вказують на обмежену детермінованість процесу та узгоджуються з властивостями хаотичного атрактора.

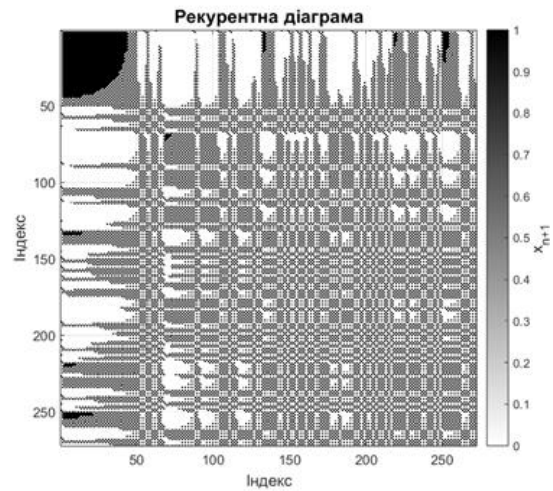


Рис. 9 – Рекурентна діаграма фазової траєкторії системи Лоренца при $r = 28$

Для перевірки універсальності застосованого підходу аналогічні дослідження проведено для системи Росслера, що також належить до класичних моделей хаотичної динаміки. Вона описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + ay \\ \frac{dz}{dt} = b + z(x - c) \end{cases}$$

де a, b, c – параметри системи.

Дивергенція системи Росслера $\text{div}F = \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial f_2}{\partial y} + \frac{\partial f_3}{\partial z} = a + x - c$, тому вона дисипативна при $a + x - c < 0$, або у смузі $x < c - a$. За стандартних параметрів системи $a = 0,2, b = 0,2, c = 5,7$ у середній області руху виконується нерівність $\text{div}F < 0$, що означає стиснення фазового об'єму і підтверджує дисипативний характер системи та існування обмеженого атрактора.

Система Росслера має дві рівноважні точки, координати яких визначаються параметрами моделі a, b, c :

$$E_{1,2} = \left(\frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4ab}}{2}, -\frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4ab}}{2a}, \frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4ab}}{2a} \right).$$

Рівноваги E_1 і E_2 є дійсними лише за виконання умови $c^2 - 4ab > 0$. За стандартних параметрів a, b, c маємо $c^2 - 4ab = 32.49 - 0.16 = 32.33 > 0$, тобто

обидві рівноваги існують. При порушенні цієї умови розроблений програмний комплекс автоматично інформує користувача про відсутність дійсних стаціонарних точок.

Тип рівноваг визначається за власними значеннями матриці Якобі. В обох точках наявні власні значення з додатною дійсною частиною, тому рівноваги є нестійкими (сідло-фокусами). Унаслідок цього фазові траєкторії здійснюють обертальний рух в околі рівноваги та поступово віддаляються від неї, залишаючись у скінченній області фазового простору, що приводить до формування обмеженої інваріантної множини – хаотичного атратора Росслера.

Фазовий портрет системи Росслера при вибраних значеннях параметрів має вигляд спіральної структури (рис. 10), що обертається навколо області рівноваги та поступово зміщується в просторі фазових координат. Траєкторія не повторює попередні витки і щільно заповнює обмежену область фазового простору, що характерно для хаотичного режиму. На відміну від атратора Лоренца з його дволопатевою геометрією, атратор Росслера має виражену спіральну організацію з переважно однобічним обертанням навколо нестійкої рівноваги, що відображає різницю у механізмах формування хаосу в цих двох системах.

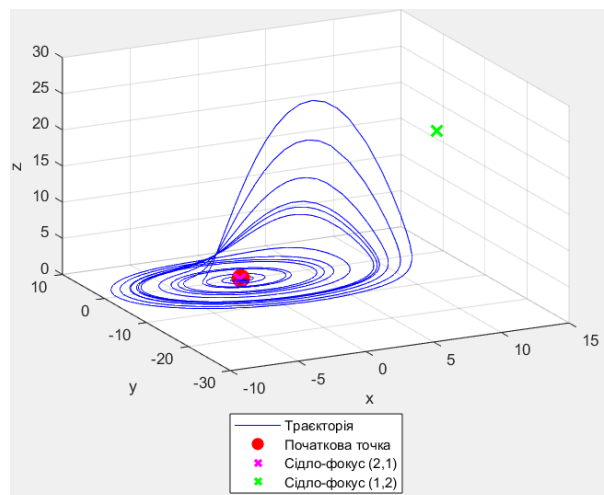


Рис. 10 – Фазовий портрет системи Росслера, з позначеними особливими точками при $a = 0,2, b = 0,2, c = 5,7$

Для детальнішого аналізу побудовано переріз Пуанкаре. Як площину перерізу обрано $y = 0$, причому враховувалися перетини з однаковим напрямком руху траєкторії.

Отримана множина точок утворює витягнуту нерегулярну область без ознак періодичності (рис. 11).

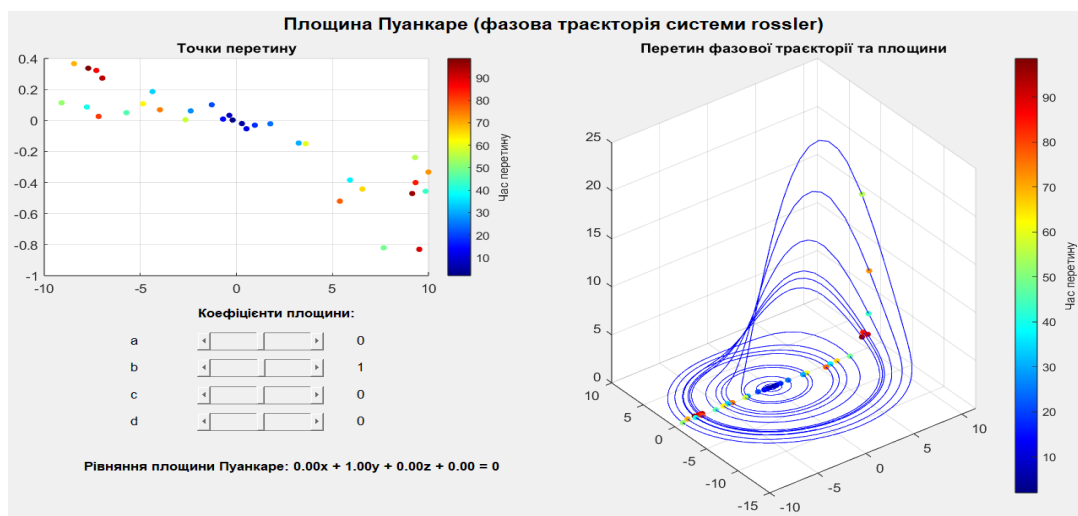


Рис. 11 – Переріз Пуанкаре системи Росслера $a = 0,2, b = 0,2, c = 5,7$

На основі послідовності точок перетину побудовано карту повернення та рекурентну діаграму. Отримані залежності мають нерегулярний характер: точки розміщені нерівномірно, без утворення скінченної

множини або замкненої кривої, що свідчить про аперіодичний характер руху.

Рекурентна діаграма містить короткі діагональні відрізки та розриви, що узгоджується з хаотичним режимом руху (рис. 12).

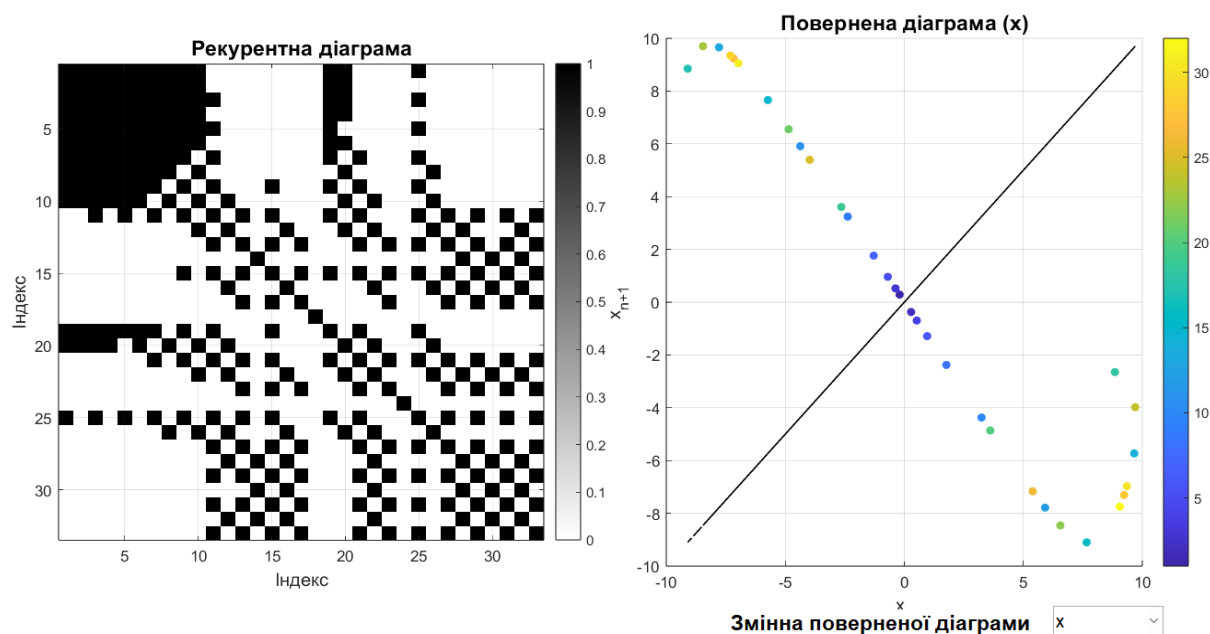
Система: rossler | Параметри: $a=0.200$, $b=0.200$, $c=5.700$ 

Рис. 12 – Карта повернення та рекурентна діаграма системи Росслера

Висновки

У роботі досліджено можливості графічних методів аналізу фазових траєкторій неперервних дисипативних динамічних систем на прикладі класичних моделей Лоренца та Росслера. Показано, що комплексне застосування фазових портретів, перерізів Пуанкаре, карт повернення та рекурентних діаграм дозволяє якісно ідентифікувати переходи між стаціонарними, періодичними і хаотичними режимами.

Встановлено, що для системи Лоренца зміна керуючого параметра r приводить до послідовної перебудови динаміки – від збіжності траєкторій до особливої точки до виникнення дивного атрактора. Аналіз особливих точок показав їх нестійкість, що зумовлює переміщення траєкторії між областями фазового простору. Для системи Росслера отримано аналогічні ознаки хаотичної поведінки, що підтверджує відтворюваність результатів для різних нелінійних моделей.

Показано, що переріз Пуанкаре, карта повернення та рекурентна діаграма, побудовані для одного чисельного розв'язку, утворюють взаємоузгоджену систему геометричних індикаторів, яка дозволяє відрізнити хаотичний режим від регулярного без використання кількісних показників складності.

Порівняння двох систем виявило як спільні риси (обмеженість траєкторій, наявність фрактальних структур у перерізах Пуанкаре, відсутність довготривалої повторюваності), так і відмінності геометричної організації атракторів. Рекурентні діаграми для обох систем підтверджують складну внутрішню структуру хаотичної динаміки.

Наукова новизна роботи полягає у систематизованій програмній реалізації комплексу взаємодоповнювальних графічних методів дослідження нелінійної динаміки в межах єдиного інструментального середовища. Розроблений інтегрований програмний комплекс у середовищі MATLAB забезпечує узгоджене виконання чисельного інтегрування, побудову фазових характеристик і їх інтерпретацію, що підвищує відтворюваність та наочність дослідження.

Отримані результати показують, що поєднання класичних геометричних методів із рекурентним аналізом є ефективним засобом діагностики складної динаміки та може бути застосоване до інших моделей із хаотичною поведінкою. Практична значущість полягає у можливості використання запропонованого підходу як універсального інструмента для дослідження широкого класу нелінійних динамічних систем, а також у навчальних і науково-дослідних задачах, пов'язаних із аналізом складної поведінки моделей. Розроблений програмний комплекс містить також інструментарій для побудови біфуркаційних діаграм при варіюванні параметрів у заданих діапазонах, що створює основу для подальшого дослідження сценаріїв переходу до хаосу.

Перелік використаних джерел

- [1] Strogatz S. H. Nonlinear Dynamics and Chaos. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2018. 505 p.
- [2] Alligood K. T., Sauer T. D., Yorke J. A. Chaos: An Introduction to Dynamical Systems. New York : Springer, 1996. 603 p.

- [3] Kuznetsov Y.A. Elements of Applied Bifurcation Theory. 3rd ed. New York : Springer, 2013. 485 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0739-7>.
- [4] Eliašová I., Fečkan M. Poincaré map for discontinuous fractional differential equations. *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 23. Article 4476. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10234476>.
- [5] Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letters*. 1987. Vol. 4, No. 9. Pp. 973–977. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/4/9/004>.
- [6] Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data / N. Marwan et al. *Physical Review E*. 2002. Vol. 66. Article 026702. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.026702>.
- [7] Recurrence plots for the analysis of complex systems / Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. *Physics Reports*. 2007. Vol. 438, no. 5–6. Pp. 237–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.001>.
- [8] Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis / M. Thiel et al. *Physica D*. 2002. Vol. 171. Pp. 138–152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(02\)00586-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(02)00586-9).
- [9] Marwan N., Kraemer K. H. Trends in recurrence analysis of dynamical systems. *The European Physical Journal Special Topics*. 2023. Vol. 232. Pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00739-8>.
- [10] Complex network approaches to nonlinear time series analysis / Y. Zou et al. *Physics Reports*. 2019. Vol. 787. Pp. 1–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.10.005>.
- [11] Unified functional network and nonlinear time series analysis for complex systems science: The pyunicorn package / J. F. Donges et al. *Chaos*. 2015. Vol. 25, no. 11. Article 113101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4934554>.
- [12] Datseris G. DynamicalSystems.jl: A Julia software library for chaos and nonlinear dynamics. *Journal of Open Source Software*. 2018. Vol. 3, no. 23. Article 598. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.00598>.
- [13] Numerical computation of bifurcations in large equilibrium systems in MATLAB / D. Bindel et al. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2014. Vol. 261. Pp. 354–372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2013.10.034>.
- [14] Methods of continuation and their implementation in the COCO software platform with application to delay differential equations / Ahsan Z., Dankowicz H., Li M., Sieber J. *Nonlinear Dynamics*. 2022. Vol. 107. Pp. 3759–3780. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06841-1>.
- [15] Кіріченко Л. О., Степаненко Є. Д., Яндуков Д. Є. Класифікація часових рядів із використанням рекурентних діаграм. *Системні технології*. 2021. № 5(136). С. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-136-2021-08>.
- [16] Графов В. В., Лупаренко О. В., Козлов М. А. Візуалізація та дослідження неперервних динамічних систем у середовищі MATLAB. *Грааль науки*. 2024. № 38 (квітень). С. 200–205. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.04.2024.034>.

GRAPHICAL METHODS FOR INVESTIGATING PHASE TRAJECTORIES OF CONTINUOUS DISSIPATIVE DYNAMICAL SYSTEMS IN THE MATLAB ENVIRONMENT

Luparenko O.V.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3005-0531>, e-mail: luparenko_e_v@pstu.edu

The paper deals with the qualitative investigation of complex dynamics in continuous dissipative dynamical systems, for which an analytical description of the global behavior of trajectories is generally difficult or impossible. The relevance of the study is determined by the growing need for reliable visual analysis tools capable of revealing the phase structure of three-dimensional nonlinear models widely used in natural sciences, engineering, and applied mathematics. The purpose of the work is to systematize and implement a unified set of graphical methods for studying phase trajectories of dissipative systems in the MATLAB environment and to evaluate their informativeness for identifying different dynamical regimes. The research is based on numerical integration of autonomous systems of first-order ordinary differential equations together with graphical phase-analysis techniques. The applied approaches include construction of phase portraits, Poincaré sections, return maps, recurrence plots, and visualization of equilibrium states. A specially developed integrated software tool with a graphical user interface provides coordinated numerical experimentation and simultaneous computation of phase-space indicators within a single computational environment. The obtained results demonstrate that the combined use of graphical methods provides qualitative identification of stationary, periodic, and chaotic regimes. The approach enables identification of attractor structures, analysis of their geometric properties, and observation of transitions between regimes caused by parameter variation. The effectiveness of the proposed methodology is illustrated using the classical Lorenz and Rössler models. The scientific novelty lies in the integration and coordinated application of

several graphical phase-analysis methods within one software environment, which makes it possible to interpret different visual indicators of dynamics simultaneously. The practical significance consists in the applicability of the developed approach to a wide class of nonlinear systems and in improving reproducibility of computational experiments. Further research is associated with combining visual diagnostics with quantitative characteristics of chaotic dynamics, including entropy-based and stability measures.

Keywords: dissipative dynamical system; phase space; phase trajectories; graphical analysis methods; Poincaré section; return map; recurrence analysis; chaotic attractor; nonlinear dynamics; MATLAB.

References

- [1] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [2] K. T. Alligood, T. D. Sauer, and J. A. Yorke, *Chaos: An Introduction to Dynamical Systems*. New York, NY, USA: Springer, 1996.
- [3] Y. A. Kuznetsov, *Elements of Applied Bifurcation Theory*, 3rd ed. New York, NY, USA: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-1-4612-0739-7.
- [4] I. Eliašová, and M. Fečkan, “Poincaré map for discontinuous fractional differential equations,” *Mathematics*, vol. 10, no. 23, article 4476, 2022. doi: 10.3390/math10234476.
- [5] J.-P. Eckmann, S. O. Kamphorst, and D. Ruelle, “Recurrence plots of dynamical systems,” *Europhysics Letters*, vol. 4, no. 9, pp. 973–977, 1987. doi: 10.1209/0295-5075/4/9/004.
- [6] N. Marwan, N. Wessel, U. Meyerfeldt, A. Schirdewan, and J. Kurths, “Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data,” *Physical Review E*, vol. 66, article 026702, 2002. doi: 10.1103/PhysRevE.66.026702.
- [7] N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, and J. Kurths, “Recurrence plots for the analysis of complex systems,” *Physics Reports*, vol. 438, no. 5–6, pp. 237–329, 2007. doi: 10.1016/j.physrep.2006.11.001.
- [8] M. Thiel, M. C. Romano, J. Kurths, R. Meucci, and E. Allaria, “Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis,” *Physica D*, vol. 171, pp. 138–152, 2002. doi: 10.1016/S0167-2789(02)00586-9.
- [9] N. Marwan, and K. H. Kraemer, “Trends in recurrence analysis of dynamical systems,” *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 232, pp. 1–14, 2023. doi: 10.1140/epjs/s11734-022-00739-8.
- [10] Y. Zou, R. V. Donner, N. Marwan, J. F. Donges, and J. Kurths, “Complex network approaches to nonlinear time series analysis,” *Physics Reports*, vol. 787, pp. 1–97, 2019. doi: 10.1016/j.physrep.2018.10.005.
- [11] J. F. Donges et al., “Unified functional network and nonlinear time series analysis for complex systems science: The pyunicorn package,” *Chaos*, vol. 25, no. 11, article 113101, 2015. doi: 10.1063/1.4934554.
- [12] G. Datseris, “DynamicalSystems.jl: A Julia software library for chaos and nonlinear dynamics,” *Journal of Open Source Software*, vol. 3, no. 23, article 598, 2018. doi: 10.21105/joss.00598.
- [13] D. Bindel, M. Friedman, W. Govaerts, J. Hughes, and Y. A. Kuznetsov, “Numerical computation of bifurcations in large equilibrium systems in MATLAB,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 261, pp. 354–372, 2014. doi: 10.1016/j.cam.2013.10.034.
- [14] Z. Ahsan, H. Dankowicz, M. Li, and J. Sieber, “Methods of continuation and their implementation in the COCO software platform with application to delay differential equations,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 107, pp. 3759–3780, 2022. doi: 10.1007/s11071-021-06841-1.
- [15] L. O. Kirichenko, Ye. D. Stepanenko, and D. Ye. Yandukov, “Klasyfikatsiia chasovykh riadiv iz vykorystanniam rekurentnykh diahram” [“Classification of time series using recurrence plots”], *Systemni tekhnolohii – System Technologies*, no. 5(136), pp. 85–94, 2021. doi: 10.34185/1562-9945-5-136-2021-08. (Ukr.).
- [16] V. V. Grafov, O. V. Luparenko, and M. A. Kozlov, “Vizualizatsiia ta doslidzhennia neperervnykh dynamichnykh system u seredovyschi MATLAB” [“Visualization and investigation of continuous dynamical systems in the MATLAB environment”], *Hraal nauky – Grail of Science*, no. 38, pp. 200–205, 2024. doi: 10.36074/grail-of-science.12.04.2024.034. (Ukr.).

Стаття надійшла 12.01.2026

Стаття прийнята 20.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Лупаренко О. В. Графічні методи дослідження фазових траєкторій неперервних дисипативних динамічних систем у середовищі MATLAB. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 1. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359770>.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОГО ПОХОДЖЕННЯ ТА ЛІЦЕНЗІЙНИХ УМОВ ПРОГРАМНОГО КОДУ, ЗГЕНЕРОВАНОГО ВЕЛИКИМИ МОВНИМИ МОДЕЛЯМИ

Романенко С.О.

ст. викладач, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0240-0777>, e-mail: serhi.romanenko@viti.edu.ua

Активне впровадження великих мовних моделей у процес розроблення програмного забезпечення істотно змінює підходи до створення програмного коду. Одним із найбільш поширених сценаріїв використання таких моделей є автоматична генерація програмних фрагментів, що дозволяє підвищити продуктивність розробників та скоротити час реалізації програмних проєктів. Водночас застосування автоматично згенерованого коду породжує низку нових проблем, пов'язаних із відсутністю інформації про його походження, що ускладнює перевірку надійності джерела, а також може призводити до порушення авторських прав і ліцензійних умов. У роботі розглянуто проблему визначення походження програмного коду, створеного за допомогою великих мовних моделей, та запропоновано підхід до її вирішення. Метою дослідження є розроблення методу встановлення ймовірних джерел програмного коду та визначення можливих ліцензій його використання на основі аналізу подібності між згенерованими та знайденими у відкритих джерелах фрагментами. Запропонований підхід передбачає поєднання можливостей мовних моделей із механізмами вебпошуку, подальшим аналізом текстової подібності та виявленням клонів програмного коду. У результаті формується перелік вебресурсів, що можуть містити схожі фрагменти коду, а також здійснюється спроба автоматичного визначення їхніх ліцензійних умов. Отримані результати демонструють можливість ефективної фільтрації нерелевантних джерел та підвищення прозорості використання автоматично згенерованого програмного забезпечення. Наукова новизна дослідження полягає у поєднанні методів аналізу подібності програмного коду з інструментами вебпошуку для встановлення його ймовірного походження. Практична значущість роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу для підвищення надійності програмних продуктів і зменшення ризиків порушення ліцензійних вимог. Перспективним напрямом подальших досліджень є удосконалення алгоритмів пошуку програмного коду та розширення методів автоматичного визначення його ліцензійних характеристик.

Ключові слова: великі мовні моделі; генерація програмного коду; походження програмного коду; аналіз подібності коду; ліцензування програмного забезпечення; програмна інженерія; штучний інтелект.

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту призвів до широкого впровадження великих мовних моделей (LLM) у процес розроблення програмного забезпечення. Сучасні системи на основі LLM здатні генерувати програмний код різними мовами програмування, допомагати у написанні алгоритмів, створенні тестів та документуванні програмних систем. Завдяки цьому значно підвищується продуктивність розробників та скорочується час створення програмних продуктів.

Разом із тим використання автоматично згенерованого програмного коду супроводжується рядом проблем. Однією з ключових є відсутність достовірної інформації про походження такого коду. У традиційній практиці повторного використання програмних компонентів із відкритих джерел існує можливість встановити автора або джерело коду, що дозволяє оцінити його надійність та перевірити ліцензійні умови використання. У випадку ж із кодом, створеним мовними моделями, така інформація часто відсутня.

Додаткову складність становить явище часткового відтворення фрагментів коду, що містилися у навчальних наборах даних LLM. У результаті цього згенерований код може бути подібним або навіть ідентичним до вже існуючих реалізацій, які поширюються під певними ліцензіями. Це створює ризик порушення

авторських прав або ліцензійних вимог під час використання такого коду у програмних проєктах.

Таким чином, виникає наукова та практична проблема розроблення методів визначення можливого походження програмного коду, згенерованого LLM, а також автоматичного встановлення ліцензійних умов його використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика використання LLM у програмній інженерії активно досліджується в останні роки. Значна кількість наукових робіт присвячена оцінюванню ефективності генерації програмного коду за допомогою LLM, а також аналізу якості та коректності отриманих результатів.

У ряді досліджень розглядається явище memorization, яке полягає у здатності моделей відтворювати фрагменти даних, що використовувалися під час їх навчання. У контексті програмування це означає можливість появи у згенерованому коді фрагментів, які вже існують у відкритих репозиторіях програмного забезпечення [1-6].

Інші дослідження присвячені аналізу впливу параметрів генерації тексту на ймовірність відтворення ліцензованого програмного коду. Зокрема, встановлено, що збільшення контексту у запитах до мовної моделі може підвищувати ймовірність відтворення

фрагментів програмного коду з відкритих джерел, тоді як зміна параметрів генерації може зменшувати цей ризик [7-12].

Окремим напрямом досліджень є аналіз походження програмного коду за допомогою методів виявлення клонів програмних фрагментів та аналізу текстової подібності. Такі підходи дозволяють виявляти схожі фрагменти програмного коду у великих репозиторіях та визначати їх потенційні джерела [13-15].

Разом із тим існуючі дослідження здебільшого орієнтовані на аналіз навчальних наборів даних LLM або на перевірку якості згенерованого коду. Питання автоматичного визначення походження коду та його ліцензійних характеристик залишаються недостатньо дослідженими [8, 16].

Мета статті

Метою статті є розроблення методу визначення ймовірного походження програмного коду, згенерованого LLM, та встановлення можливих ліцензій його використання на основі аналізу подібності між згенерованими та знайденими у відкритих джерелах фрагментами програмного коду.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є програмний код, згенерований LLM у процесі виконання задач програмування.

Предметом дослідження є методи визначення походження такого коду на основі аналізу подібності з фрагментами програмного забезпечення, що розміщені у відкритих вебресурсах.

Для досягнення поставленої мети використано такі методи:

аналіз текстової подібності програмного коду;

методи виявлення клонів програмного коду;

використання LLM для формування пошукових запитів;

аналіз метаданих вебресурсів та програмних репозиторіїв;

автоматичне визначення ліцензій програмного забезпечення.

Запропонований підхід передбачає використання можливостей LLM для пошуку у мережі Інтернет вебресурсів, що можуть містити фрагменти програмного коду, подібні до згенерованих.

Виклад основного матеріалу

У даній роботі запропоновано підхід, призначений для визначення ймовірного походження програмного коду, згенерованого LLM, а також для встановлення можливих ліцензій його подальшого використання. Запропонований підхід може бути реалізований у вигляді програмного розширення для інтегрованих середовищ розроблення програмного забезпечення, зокрема в середовищі VSCode, із використанням можливостей системи Copilot [5].

Запропоноване рішення передбачає два основні режими функціонування.

1. генерація коду з подальшим пошуком джерел (режим 1).

В даному режимі розробник формує запит до мовної моделі через інтерфейс AICertify для автоматичної генерації фрагмента програмного коду. Отриманий результат використовується як основа для подальшого аналізу: згенерований код автоматично застосовується для виконання вебпошуку з метою виявлення ресурсів мережі Інтернет, які можуть містити подібні або ідентичні фрагменти програмного коду.

2. пошук можливих джерел для наявного фрагмента коду (режим 2).

В даному режимі розробник безпосередньо вибирає певний фрагмент програмного коду в інтегрованому середовищі розроблення та ініціює процедуру пошуку потенційних джерел його походження. Слід зазначити, що такий режим може використовуватися не лише для автоматично згенерованого коду, але й для будь-якого фрагмента програмного забезпечення, походження якого потребує уточнення.

Запропонований підхід ґрунтується на поєднанні методів аналізу текстової подібності та виявлення клонів програмного коду. Це дозволяє визначати можливі джерела походження фрагментів програмного коду, після чого для кожного знайденого ресурсу виконується аналіз метаданих та вмісту вебсторінок з метою встановлення відповідної інформації про ліцензування.

На відміну від підходів, подібних до системи SourceGraph [8], які переважно орієнтовані на перевірку того, чи може згенерований код бути частиною навчальних наборів даних LLM, запропонований підхід передбачає безпосередній пошук відповідних фрагментів програмного коду у відкритих інтернет-джерелах. Такий підхід дозволяє визначати можливі джерела походження програмного коду та пов'язані з ними ліцензійні умови навіть у випадках, коли навчальні дані LLM залишаються недоступними або невідомими.

Було проведено попереднє експериментальне оцінювання запропонованого підходу із використанням 112 завдань програмування з набору даних HumanEval [8] та 108 завдань з набору MBPP [15]. Отримані результати свідчать про перспективність запропонованого підходу. Зокрема, навіть у випадках, коли великі мовні моделі не завжди надають релевантні посилання на джерела програмного коду, застосування механізмів аналізу подібності дозволяє відфільтровувати нерелевантні результати та залишати лише ті посилання, які з високою ймовірністю можуть бути пов'язані з походженням згенерованого коду.

Архітектура

На рис. 1 представлено архітектуру запропонованого підходу. Концепція передбачає інтеграцію з інструментами підтримки розроблення програмного забезпечення, зокрема з системами генерації коду на основі LLM, такими як AICertify, що може

використовуватися в середовищі VSCode. Взаємодія з мовною моделлю здійснюється через спеціалізованих агентів, які виступають точками входу для реалізації різних сценаріїв використання запропонованого підходу.

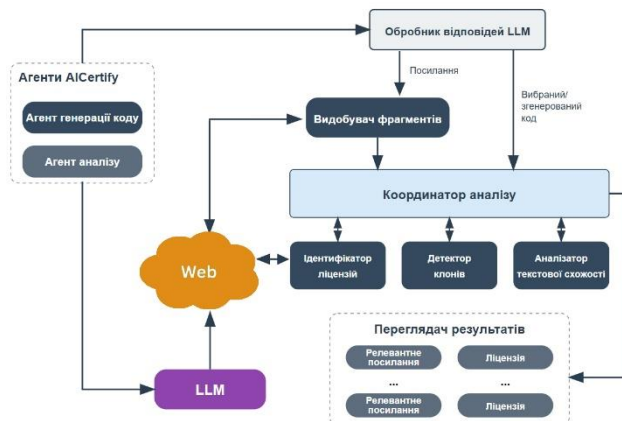


Рис. 1 – Архітектура запропонованого рішення

У межах архітектури передбачено два основні агенти, які відповідають двом режимам функціонування системи: режиму генерації коду з подальшим аналізом джерел та режиму аналізу вже наявного фрагмента коду). Для отримання можливих джерел походження коду використовується мовна модель із підтримкою веб-пошуку. У якості прикладу реалізації може застосовуватися API мовних моделей, що забезпечує доступ до веб-пошуку [12], хоча запропонований підхід не обмежується використанням конкретної реалізації.

Для підтримки різних режимів функціонування в архітектурі передбачено два спеціалізовані агенти.

Перший агент використовується у сценарії, коли розробник звертається до мовної моделі із запитом на генерацію програмного коду. У такому випадку модель спочатку генерує фрагмент коду відповідно до поставленого завдання. Після цього отриманий результат використовується для формування додаткового запиту до мовної моделі з метою виконання веб-пошуку та отримання посилань на ресурси, які можуть містити подібні або ідентичні фрагменти програмного коду [2]. Прикладом такого запиту може бути пошук джерел, що містять інформацію або реалізації, подібні до згенерованого фрагмента коду.

Другий агент використовується у випадку, коли розробник має готовий фрагмент програмного коду та бажає визначити його можливе походження. У цьому режимі формується структурований запит, що містить вибраний фрагмент коду та інформацію про мову програмування, після чого виконується пошук веб-ресурсів, які можуть містити подібні реалізації [1].

Модуль відповідей мовної моделі

Компонент оброблення відповідей мовної моделі призначений для перетворення неструктурованого результату роботи LLM – зокрема, згенерованого

програмного коду та отриманих вебпосилань – у структуровані дані, які можуть бути використані для подальшого аналізу. Такі дані передаються до модуля аналізу подібності та модуля визначення ліцензій.

Модуль видобування фрагментів коду

Даний компонент аналізує HTML-вміст отриманих вебресурсів з метою видобування фрагментів програмного коду. Оскільки структура вебконтенту різних ресурсів є неоднорідною, застосовуються спеціалізовані стратегії видобування, орієнтовані на конкретні домени. Наприклад, для ресурсів типу GeeksforGeeks програмний код може бути отриманий із вкладених тегів `<div class="code">` та `<span>`, тоді як для репозиторіїв GitLab використовується доступ до прямих (raw) версій файлів. Архітектура підходу передбачає можливість розширення списку підтримуваних ресурсів шляхом додавання нових правил видобування.

Модуль координації аналізу коду

Даний компонент об'єднує фрагменти коду, отримані з веб-ресурсів, із вибраним або згенерованим фрагментом коду та виконує процедури визначення подібності між ними. Метою цього етапу є фільтрація нерелевантних посилань і збереження лише тих джерел, які містять програмний код із високим рівнем відповідності.

У межах запропонованого підходу можуть використовуватися два типи методів аналізу:

метрики текстової подібності, що оцінюють схожість фрагментів коду на основі їх текстового представлення;

методи виявлення клонів програмного коду, спрямовані на виявлення структурно подібних реалізацій.

Зокрема, для виявлення клонів може застосовуватися інструмент CCFinderSW [13], який дозволяє ідентифікувати потенційні клони між парами програмних фрагментів. Аналіз текстової подібності може здійснюватися із використанням векторного підходу, відповідно до якого кожен фрагмент коду токенизується, перетворюється на векторне представлення, після чого між векторами обчислюється косинусна міра подібності.

Модуль ідентифікації ліцензій

Одним із функціональних компонентів запропонованого підходу є модуль ідентифікації ліцензій, призначений для визначення умов повторного використання та розповсюдження фрагментів програмного коду, отриманих із відкритих інтернет-джерел.

Для досягнення цієї мети передбачено використання декількох стратегій визначення ліцензій. У випадку, коли отримані посилання вказують на репозиторії GitHub, система може звертатися до відповідного API для отримання метаданих репозиторію, зокрема інформації про ліцензію програмного забезпечення. Якщо така інформація відсутня у метаданих, здійснюється пошук файлу ліцензії в структурі репозиторію (наприклад, файлів типу TERMS, TERMS.txt тощо). У разі виявлення такого файлу його вміст може бути проаналізований за допомогою спеціалізованих інструментів

класифікації ліцензій, зокрема FOSSology [6], що дозволяє автоматично визначити тип ліцензії.

В інших випадках визначення ліцензії може базуватися на політиці ліцензування відповідного веб-ресурсу. Наприклад, відомо, що всі фрагменти коду, опубліковані на платформі GeeksforGeeks, розповсюджуються відповідно до ліцензії CC BY 4.0. З цією метою в межах запропонованого підходу може підтримуватися база відповідностей типу домен – ліцензія.

Для веб-ресурсів, для яких відсутні явні правила ліцензування, здійснюється аналіз HTML-коду веб-сторінки з метою пошуку ключових слів, що відповідають відомим типам ліцензій. Для цього використовується попередньо сформований перелік ліцензій, заснований на стандарті CycloneDX [10]. У разі виявлення відповідних збігів інформація використовується для визначення потенційної ліцензії програмного коду.

Модуль представлення результатів

Після завершення етапів аналізу подібності програмного коду та визначення ліцензійних характеристик виконується процедура фільтрації отриманих результатів. На основі заданих порогових значень подібності зберігаються лише ті пари фрагментів коду, для яких показники подібності перевищують встановлений поріг. Такий підхід дозволяє зменшити кількість нерелевантних результатів та забезпечити відображення лише потенційно значущих джерел.

Отримані результати агрегуються та можуть бути представлені у вигляді структурованої таблиці, що містить перелік URL-адрес можливих джерел походження програмного коду разом із відповідною інформацією про ліцензійні умови його використання. Такий спосіб представлення результатів дозволяє розробникам швидко оцінити можливі джерела походження коду та врахувати відповідні ліцензійні обмеження під час його подальшого використання.

Обмеження запропонованого підходу

Запропонований підхід має певні обмеження, які необхідно враховувати під час його застосування.

По-перше, визначення подібності між фрагментами коду дозволяє виявити лише ймовірні джерела походження, однак не гарантує, що згенерований код безпосередньо походить саме з відповідного веб-ресурсу. Крім того, на поточному етапі підхід не дозволяє однозначно визначити, який саме із порівнюваних фрагментів коду був згенерований мовною моделлю.

По-друге, ефективність запропонованого підходу значною мірою залежить від можливостей механізмів веб-пошуку, що використовуються мовною моделлю. Додатково на точність результатів можуть впливати характеристики застосованих алгоритмів виявлення клонів програмного коду та інструментів автоматичної класифікації ліцензій.

Застосування

Для перевірки працездатності запропонованого підходу може бути реалізовано експериментальний прототип у вигляді програмного розширення для інтегрованого середовища розроблення VSCode. Така

реалізація може передбачати використання зовнішніх бібліотек та інструментів, зокрема компонентів для аналізу клонів програмного коду та автоматичної класифікації ліцензій.

У межах запропонованої архітектури підтримуються два основні сценарії застосування системи:

аналіз коду, згенерованого мовною моделлю під час взаємодії з користувачем;

аналіз довільного фрагмента програмного коду, вибраного безпосередньо у середовищі розроблення.

У першому сценарії розробник формує запит до мовної моделі щодо генерації фрагмента програмного коду для виконання певного завдання. Наприклад, таким завданням може бути реалізація алгоритму рекурсивного розпакування архіву у форматі ZIP. Після отримання відповіді мовної моделі згенерований код використовується як основа для подальшого аналізу.

Зокрема, на основі отриманого фрагмента коду формується запит до системи вебпошуку з метою виявлення інтернет-ресурсів, які можуть містити подібні або ідентичні реалізації. Отримані результати проходять подальший етап оброблення, під час якого здійснюється видобування фрагментів програмного коду з відповідних веб-сторінок та їх порівняння із згенерованим кодом.

На основі значень метрик подібності виконується фільтрація отриманих результатів. Це дозволяє усунути нерелевантні посилання, зокрема ті, що стосуються загального опису завдання програмування, але не містять безпосередньо відповідних фрагментів коду. Для кожного знайденого джерела, яке містить подібний програмний код, додатково виконується процедура визначення ліцензії. У результаті розробник отримує інформацію про можливі джерела походження фрагмента коду та пов'язані з ними ліцензійні умови, що може бути корисним під час подальшого використання або розповсюдження програмного забезпечення.

Другий сценарій передбачає аналіз уже наявного фрагмента програмного коду. У даному випадку розробник може вручну вибрати відповідний фрагмент у кодовій базі та ініціювати процедуру визначення його можливого походження.

Після цього система формує пошуковий запит, що містить вибраний фрагмент коду та інформацію про мову програмування. Отримані результати вебпошуку проходять аналогічні етапи оброблення, які включають видобування програмних фрагментів із вебресурсів, аналіз подібності та визначення можливих ліцензійних умов.

Застосування такого підходу дозволяє не лише аналізувати код, згенерований LLM, але й досліджувати походження будь-якого фрагмента програмного забезпечення, що може бути корисним під час аудиту програмних систем, перевірки ліцензійної сумісності або аналізу повторного використання коду.

Наступним етапом буде виклик другого агента, який автоматично створює запит до LLM для

отримання посилань на потенційні джерела, які містять код, подібний до вибраного коду. Відповідь моделі містить список посилань, що вказують на потенційно релевантні вебсторінки. З цього моменту конвеєр продовжується, як описано в попередньому режимі роботи. Також у цьому випадку ймовірно походження коду відображається розробнику через вбудоване HTML-вигляд в IDE.

Попередня оцінка

Для перевірки ефективності запропонованого підходу передбачено оцінку точності у сценарії, де, маючи фрагмент коду, система повинна повертати релевантні посилання на потенційні джерела. Оцінювання повноти при цьому не здійснюється, оскільки повний перелік справжніх джерел для автоматично згенерованого коду зазвичай є невідомим, а також відсутні еталонні набори даних з позначеними джерелами, що дозволяли б виконати повну перевірку.

Для оцінки передбачається використати 112 завдань кодування (46 JavaScript та 55 Python) із набору даних HumanEval [8], для яких відомо принаймні одне релевантне посилання для автоматично згенерованого коду. Додатково планується вибрати 108 завдань (по 54 для кожної мови програмування) із бенчмарку MBPP [16], що містить приклади з реальних проєктів і зазвичай використовується для оцінки ефективності LLM у генерації коду [7].

Передбачається, що для кожного завдання спочатку AICertify згенерує код, який потім буде використано для формування запиту на отримання посилань через чат. Оцінка точності може здійснюватися шляхом незалежного аналізу вручну, де два оцінювачі перевіряють кожне посилання та узгоджують розбіжності.

Очікується, що система відображатиме лише ті посилання, які перевищують визначені пороги для метрик клонування та текстової подібності. Для різних значень порогів можна оцінити точність і середню кількість посилань, що будуть запропоновані користувачеві. Також планується перевірити можливість визначення ліцензії для кожного посилання, що дозволить користувачу оцінити, як код може бути повторно використаний або розповсюджений. При цьому слід врахувати, що не всі посилання дозволяють однозначно визначити ліцензію, особливо якщо вони вказують на блоги або посібники.

Висновки

У даній статті розглянуто проблему визначення походження програмного коду, згенерованого LLM. Запропоновано метод, що поєднує можливості мовних моделей, веб-пошуку та аналізу подібності програмного коду для встановлення потенційних джерел його походження.

Результати дослідження показують, що використання комбінованого підходу, який включає текстовий аналіз та виявлення клонів коду, дозволяє ефективно

фільтрувати нерелевантні джерела та визначати можливі вебресурси, що містять схожі фрагменти програмного забезпечення.

Практична значущість запропонованого підходу полягає у можливості його використання для підвищення надійності програмних продуктів, створених із використанням LLM, а також для зменшення ризиків порушення авторських прав і ліцензійних умов.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів пошуку програмного коду, розширення методів автоматичного визначення ліцензій та створення інструментальних засобів підтримки запропонованого підходу у середовищах розроблення програмного забезпечення.

Перелік використаних джерел

- [1] Extracting Training Data from Large Language Models / N. Carlini et al. *Proceedings of the 30-th USENIX Security Symposium*, 11–13 August 2021. Pp. 2633–2650.
- [2] Quantifying Memorization Across Neural Language Models / N. Carlini et al. arXiv preprint. arXiv:2202.07646. 2023. Pp. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.07646>.
- [3] Evaluating Large Language Models Trained on Code / M. Chen et al. arXiv preprint. arXiv:2107.03374. 2021. Pp. 3–14. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03374>.
- [4] GitHub Copilot AI pair programmer: Asset or Liability? / A. M. Dakhel et al. *Journal of Systems and Software*. 2023. Vol. 203. Article 111734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111734>.
- [5] GitHub Copilot Documentation. URL: <https://docs.github.com/en/copilot> (дата звернення: 11.08.2025).
- [6] Google Open Source. License Classifier. URL: <https://github.com/google/licenseclassifier> (дата звернення: 11.08.2025).
- [7] Is Your Code Generated by ChatGPT Really Correct? Rigorous Evaluation of Large Language Models for Code Generation / Liu J., Xia C. S., Wang Y., Zhang L. arXiv preprint. arXiv:2305.01210. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01210>.
- [8] CodeSearchNet Challenge: Evaluating the State of Semantic Code Search / H. Husain et al. arXiv preprint. arXiv:1909.09436. 2019. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.09436>.
- [9] On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big? / Bender E. M., Gebru T., McMillan-Major A., Shmitchell S. *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 3–10 March 2021. Pp. 610–623. DOI: <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>.
- [10] SPDX License List. Software Package Data Exchange (SPDX). URL: <https://spdx.org/licenses/> (дата звернення: 11.08.2025).

- [11] Training language models to follow instructions with human feedback / L. Ouyang et al. arXiv preprint. arXiv:2203.02155. 2022. Pp. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.02155>.
- [12] Unveiling Memorization in Code Models / Z. Yang et al. arXiv preprint. arXiv:2308.09932. 2023. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.09932>.
- [13] Kamiya T., Kusumoto S., Inoue K. CCFinder: a multilingual token-based code clone detection system for large scale source code. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2002. Vol. 28, no. 7. Pp. 654–670. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSE.2002.1019480>.
- [14] Deep Learning Meets Software Engineering: A Survey on Pre-Trained Models of Source Code / Niu C., Li C., Luo B., Ng V. *Thirty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-22)*, Vienna, Austria, 23–29 July 2022. Pp. 5546–5555. DOI: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2022/775>.
- [15] Code Clone Detection based on Event Embedding and Event Dependency / Huang C., Zhou H., Ye C., Li B. arXiv preprint. arXiv:2111.14183. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.14183>.
- [16] Program Synthesis with Large Language Models / J. Austin et al. arXiv preprint. arXiv:2108.07732. 2021. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07732>.

METHOD FOR DETERMINING THE PROBABLE ORIGIN AND LICENSE CONDITIONS OF PROGRAM CODE GENERATED BY LARGE LANGUAGE MODELS

Romanenko S.O.

senior lecturer, The Military Institute of Telecommunication and Information Technologies named after the Heroes of Kruty, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0240-0777>, e-mail: serhi.romanenko@viti.edu.ua

The active integration of large language models into the software development process is fundamentally changing approaches to code creation. One of the most common use cases for such models is the automatic generation of code fragments, which allows developers to increase productivity and reduce project implementation time. At the same time, the use of automatically generated code raises a number of new challenges, related to the lack of information about its origin, complicating the verification of source reliability, and potentially leading to copyright and licensing violations. This study addresses the problem of determining the origin of program code created with large language models and proposes an approach to solve it. The aim of the research is to develop a method for identifying probable sources of program code and determining possible usage licenses based on the analysis of similarity between generated code and fragments found in public sources. The proposed approach combines the capabilities of language models with web search mechanisms, followed by text similarity analysis and code clone detection. As a result, a list of web resources potentially containing similar code fragments is generated, and an attempt is made to automatically identify their licensing terms. The obtained results demonstrate the possibility of effectively filtering out irrelevant sources and increasing the transparency of using automatically generated software. The scientific novelty of this research lies in combining code similarity analysis methods with web search tools to determine its probable origin. The practical significance of the study is in the potential use of the proposed approach to enhance the reliability of software products and reduce the risks of license violations. A promising direction for future research is the improvement of code search algorithms and the expansion of methods for automatically determining licensing characteristics of code.

Keywords: large language models; code generation; code provenance; code similarity analysis; software licensing; software engineering; artificial intelligence.

References

- [1] N. Carlini et al., “Extracting Training Data from Large Language Models,” in *Proc. of the 30-th USENIX Security Symposium*, August 11–13, 2021, pp. 2633–2650.
- [2] Carlini, D. Ippolito, M. Jagielski, K. Lee, F. Tramèr, and C. Zhang, “Quantifying Memorization Across Neural Language Models,” 2023, arXiv:2202.07646, pp. 1–34. doi: [10.48550/arXiv.2202.07646](https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.07646).
- [3] M. Chen et al., “Evaluating Large Language Models Trained on Code,” 2021, arXiv:2107.03374, pp. 3–14. doi: [10.48550/arXiv.2107.03374](https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03374).
- [4] A. M. Dakhel, V. Majdinasab, A. Nikanjam, F. Khomh, M. C. Desmarais, and Z. M. J. Jiang, “GitHub Copilot AI pair programmer: Asset or Liability?,” *Journal of Systems and Software*, vol. 203, article 111734, 2023. doi: [10.1016/j.jss.2023.111734](https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111734).
- [5] GitHub Copilot Documentation. [Online]. Available: <https://docs.github.com/en/copilot>. Accessed on: August 11, 2025.
- [6] Google Open Source. License Classifier. [Online]. Available: <https://github.com/google/licenseclassifier>. Accessed on: August 11, 2025.
- [7] J. Liu, C. S. Xia, Y. Wang, and L. Zhang, “Is Your Code Generated by ChatGPT Really Correct? Rigorous Evaluation of Large Language Models for Code

- Generation,” *arXiv:2305.01210*, 2023. doi: **10.48550/arXiv.2305.01210**.
- [8] H. Husain, H.-H. Wu, T. Gazit, M. Allamanis, and M. Brockschmidt, “CodeSearchNet Challenge: Evaluating the State of Semantic Code Search,” 2019, *arXiv:1909.09436*. doi: **10.48550/arXiv.1909.09436**.
- [9] E. M. Bender, T. Gebru, A. McMillan-Major, and S. Shmitchell, “On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big?,” in *Proc. of the 2021 ACM Conf. on Fairness, Accountability, and Transparency*, March 3–10, 2021, pp. 610–623. doi: **10.1145/3442188.3445922**.
- [10] PDX License List. Software Package Data Exchange (SPDX). [Online]. Available: <https://spdx.org/licenses/>. Accessed on: August 11, 2025.
- [11] L. Ouyang et al., “Training language models to follow instructions with human feedback,” 2022, *arXiv:2203.02155*, pp. 1–46. doi: **10.48550/arXiv.2203.02155**.
- [12] Z. Yang et al., “Unveiling Memorization in Code Models,” 2023, *arXiv:2308.09932*, pp. 1–11. doi: **10.48550/arXiv.2308.09932**.
- [13] T. Kamiya, S. Kusumoto, and K. Inoue, “CCFinder: a multilingual token-based code clone detection system for large scale source code,” *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 28, no. 7, pp. 654–670, 2002. doi: **10.1109/TSE.2002.1019480**.
- [14] C. Niu, C. Li, B. Luo, and V. Ng, “Deep Learning Meets Software Engineering: A Survey on Pre-Trained Models of Source Code,” in *Proc. of the Thirty-First Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-22)*, Vienna, Austria, July 23–29, 2022, pp. 5546–5555. doi: **10.24963/ijcai.2022/775**.
- [15] C. Huang, H. Zhou, C. Ye, and B. Li, “Code Clone Detection based on Event Embedding and Event Dependency,” 2021, *arXiv:2111.14183*. doi: **10.48550/arXiv.2111.14183**.
- [16] J. Austin et al., “Program Synthesis with Large Language Models,” 2021, *arXiv:2108.07732*, pp. 1–12. doi: **10.48550/arXiv.2108.07732**.

Стаття надійшла 29.01.2026

Стаття прийнята 01.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Романенко С. О. Метод визначення ймовірного походження та ліцензійних умов програмного коду, згенерованого великими мовними моделями. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 1. С. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359775>.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В ЗАДАЧАХ
ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ

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;

Перцев Є.А.

магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail:
pertsev_y_a@students.pstu.edu

У сучасних умовах цифровізації освіти особливої ваги набуває питання об'єктивного оцінювання результатів навчання та своєчасного виявлення студентів, які потребують додаткової підтримки. У даній роботі розглянуто можливості застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування підсумкових результатів семестрового контролю. Актуальність дослідження зумовлена потребою в інструментах об'єктивізації оцінювання та своєчасного виявлення ризиків неуспішності для коригування індивідуальної освітньої траєкторії. Дослідження спрямоване не лише на отримання точного числового бала, а й на визначення рівня успішності студента в узагальненій категоріальній формі (від «Very low» до «Good»), що дозволяє глибше проаналізувати якість освітнього процесу та своєчасно скоригувати індивідуальну траєкторію навчання. У роботі використано набір даних «Students Performance Factors», який охоплює показники відвідуваності занять, інтенсивності навчання, попередньої академічної підготовки та соціально-економічних чинників. Підготовка даних включала очищення від аномалій, нормалізацію ознак і кореляційний аналіз для відбору найбільш інформативних параметрів. Для експериментального дослідження застосовано лінійну регресію, багатошаровий перцептрон (нейронну мережу), дерева рішень та випадковий ліс. Оцінювання моделей здійснювалося за метриками R^2 і MAE для задач регресії та за показником точності для задач класифікації. Результати показали, що для прогнозування точного підсумкового балу найбільш доцільною виявилася лінійна регресія, яка продемонструвала високу точність та простоту інтерпретації. Водночас у задачі розподілу студентів за рівнями успішності кращі результати отримано за допомогою нейронної мережі. Аналіз дерева рішень підтвердив важливу роль відвідуваності як ключового чинника академічного успіху. Отриманні результати показують, що вибір методу має залежати від формату прогнозу: для кількісних оцінок доцільно використовувати регресію, а для якісного розділення студентів за рівнями – нейронні мережі. Дослідження відкриває перспективи впровадження інструментів освітньої аналітики для підвищення ефективності навчання.

Ключові слова: машинне навчання; регресія; дерева рішень; нейронні мережі; оцінка успішності; академічна успішність.

Постановка проблеми

Прогнозування підсумкової оцінки студентів під час семестрового контролю є важливим інструментом об'єктивізації процесу оцінювання та визначення рівня сформованості навчальних компетентностей, ще до проведення фінального іспиту за курс. Використання моделей передбачення дає змогу здійснювати попередній аналіз академічної успішності, своєчасно виявляти потенційні ризики зниження результатів та приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо коригування індивідуальної освітньої траєкторії студента.

Застосування прогнозних підходів також створює передумови для підвищення ефективності навчального процесу, оскільки надає студенту можливість цілеспрямовано зосередитися на проблемних аспектах підготовки та оптимізувати розподіл навчального навантаження.

Крім того, у випадках неможливості складання підсумкового контролю з поважних причин, за умови попереднього погодження зі студентом та відповідного нормативного регулювання, результати прогнозної моделі можуть розглядатися як альтернативний механізм визначення очікуваного рівня досягнень. Це дозволяє

забезпечити безперервність освітнього процесу та зберегти принципи академічної доброчесності й об'єктивності оцінювання.

Існує щонайменше два підходи до такого прогнозування.

1. Прогнозування конкретного числового балу. Цей варіант повинен бути максимально точним, оскільки навіть один бал є важливим для оцінювання. Такий підхід доцільний для формування рейтингу, порівняння академічної успішності між студентами та глибокого аналізу якості навчання. У цьому випадку модель має забезпечувати мінімальну абсолютну похибку та високу точність передбачення.

2. Прогнозування категорії успішності. Тут завдання складається з визначення класу, до якого потрапляє студент зі своїми результатами за курс. Важливо правильно віднести результат до певного класу («Відмінний», «Добрий», «Середній», «Задовільний», «Незадовільний» або «Залік» / «Не залік»), в залежності від кінцевого типу оцінювання. Незначні відхилення в числовому значенні допустимі, якщо модель коректно визначає сам клас, до якого потрапляють результати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В літературі представлено ряд досліджень, які направлені на визначення класу оцінок здобувачів. Так у статті [1] реалізовано різні методи класифікації машинного навчання для академічної успішності студентів з метою прогнозування результатів. Для цього дані студентів магістратури (MS(CS)) були зібрані з державного університету Пакистану через їхні завдання, тести та сесійні оцінки. Для проведення всіх експериментів, а саме попередньої обробки даних, класифікації та візуалізації, було використано інструмент інтелектуального аналізу даних WEKA.

Головною метою роботи [2] є порівняння продуктивності алгоритмів інтелектуального аналізу даних для прогнозування академічної успішності студентів. Набір даних було підготовлено на основі академічних результатів студентів, зібраних з Міжнародного університету науки і технологій армії Бангладеш. Було реалізовано два алгоритми інтелектуального аналізу даних, а саме наївний байєсівський класифікатор та дерево рішень J48, а отриману точність порівняно один з одним. Після попередньої обробки (очищення, дискретизації) як наївний байєсівський класифікатор, так і алгоритм дерева рішень J48 забезпечують точність понад 88,75%.

Дослідження [3] зосереджено на створенні моделі для прогнозування категорій сумарного середнього балу (CGPA) та виявлення студентів, які можуть мати труднощі в навчанні під час навчання в університеті. У дослідженні використовуються дані, пов'язані зі студентами, для класифікації CGPA за певними оцінками (O, A+, A, B+, B, C+, C та F), а також протестовано різні методи машинного навчання, такі як Naive Bayes, JRIP, J48, Random Forest та CatBoost. Оскільки деякі оцінки, такі як C та A+, мали менше студентів, для балансування набору даних було використано метод однокласового схрещування. Моделі були оцінені за допомогою десятикратної перехресної перевірки, і CatBoost показав найкращі результати після балансування даних.

Питання навчання стоїть гостро для різних університетів світу, так наприклад багато студентів болгарських університетів кидають навчання в університеті, не завершивши його. Виявлення студентів, які ризикують кинути навчання, дозволяє своєчасно вживати заходів для їх утримання. У статті [4] представлені результати дослідження, проведеного серед студентів інженерних програм Тракійського університету – Стара Загора. Зібрані дані піддаються обробці, метою якої є пошук найважливіших атрибутів, що визначають ризик кидання навчання в університеті. Обробка проводиться за допомогою програмного забезпечення з відкритим кодом Weka. Застосовуються різні алгоритми вибору атрибутів з різними методами пошуку. Найбільш підходящий алгоритм вибору атрибутів було обрано після застосування класифікатора BayesNet до отриманих результатів. Порівнювалися показники TP

rate, Precision та F-measure. При застосуванні InfoGainAttributeEval отримані найвищі результати щодо точності класифікації.

Точне прогнозування успішності учнів є значним кроком до покращення результатів навчання шляхом прийняття рішень на основі даних. З розвитком інтелектуального аналізу даних про освіту (EDM), алгоритми машинного навчання (ML) стали ефективними інструментами для аналізу даних учнів з метою виявлення прихованих цікавинок. У цій статті представлено комплексне дослідження використання алгоритму випадкового лісу (RF) для прогнозування академічної успішності учнів. Використовуючи різні ознаки, такі як демографічні дані, попередні оцінки, відвідуваність, соціально-економічний статус та позакласна участь, класифікатор випадкового лісу забезпечує високу точність прогнозування, водночас пропонуючи інтерпретованість за допомогою рейтингу важливості ознак. У цьому дослідженні [5] далі обговорюються навчання моделі, оцінка успішності, графічні представлення та наслідки інтеграції таких систем в освітні установи. Крім того, досліджуються обмеження та майбутні напрямки вдосконалення, підкреслюючи ширший потенціал ML у трансформації сектору освіти.

Освітній data mining – це процес застосування інструментів та методів аналізу даних у навчальному закладі. Освітні заклади отримують великі обсяги даних від учнів протягом їхнього навчання. Однак ці дані часто залишаються недостатньо використаними та не покращують академічну успішність учнів. Рівень успішності або невдачі учнів може визначити успіх будь-якого навчального закладу. Запропонована система використовує освітній data mining для аналізу даних, щоб робити прогнози щодо успішності учнів. До даних було застосовано метод класифікації (навчання з учителем) та алгоритм дерева рішень для прогнозування їхньої успішності на випускних іспитах. У цьому проекті [6] для попередньої обробки даних було використано Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis). Класифікатор дерева рішень з Python sci-kit-learn було застосовано до набору даних та візуалізовано графічно. Мета дослідження полягає в тому, щоб ми могли передавати будь-які нові дані класифікатору, і він зміг би відповідно передбачити правильний клас.

У статті [7] виступає проблема прогнозування академічної успішності студентів із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Аналіз та апробація відповідних методів стали на етапі у напрямку вдосконалення освітньої аналітики та підвищення якості навчального процесу. В межах дослідження було висвітлено і протестовано кілька моделей машинного навчання з призначенням визначення їх ефективності в завданнях передбачення результатів навчання. Було здійснено оцінку основних показників продуктивності моделей, які дозволили провести якісний аналіз їхньої точності. Результати матриці помилок свідчать про задовільну роботу моделей після здійснення оптимізації їхніх гіперпараметрів. Здебільшого моделі показали високий

рівень точності класифікації. На цьому, було продемонстровано практичне використання побудованих моделей для аналізу нових даних. Загалом реалізовано ефективне рішення задач прогнозного моделювання з використанням алгоритмів Random Forest та XGBoost, яке можна адаптувати для подальшого вдосконалення та реального впровадження на практику.

У статті [8] було зазначено використання різноманітних методів і алгоритмів для обробки даних, зокрема для прогнозування та аналізу поведінки користувачів онлайн-платформи. У процесі дослідження проведено аналіз доступних інструментів для інтеграції моделей машинного навчання та аналітичних інструментів у веб-застосунки. Проведено порівняння кількох алгоритмів машинного навчання, зокрема таких як: Random Forest, KNN-регресії, гребеневої регресії та еластичної мережі, для аналізу залученості користувачів на платформі Prometheus. Результати показують, що використання різних методів машинного навчання дозволяє здійснити точний прогноз щодо залученості користувачів, зокрема з урахуванням змін у соціально-демографічному контексті.

Виходячи з огляду літератури, можна помітити, що актуальним та достовірним методом для оцінки успішності є використання методів машинного навчання. Причому для визначення успішності в літературі застосовуються різні методи машинного навчання.

Можна підсумувати, що для моделей, що прогнозують точний бал, використовують частіше наступне:

- Багатовимірна лінійна регресія – класичний статистичний інструмент, який дозволяє встановити залежність між кількома незалежними змінними та результативним показником [9].

- Багатошаровий перцептрон (MLP) – нейронна мережа прямого поширення з нелінійними функціями активації, здатна виявляти складні приховані закономірності в даних. Для її навчання використовується алгоритм RPROP [10].

Метою досліджень цього напрямку є порівняння ефективності традиційного статистичного підходу та нейромережевої моделі у задачі точного прогнозування результатів.

Коли в задачах стоїть визначення класу успішності, то частіше використовують наступні моделі:

- Дерево рішень (алгоритм SPRINT) – модель, що послідовно розподіляє дані за умовами, формуючи структуру, подібну до схеми прийняття рішень [11].

- Випадковий ліс (Random Forest) – ансамблевий метод, який поєднує результати багатьох дерев рішень для підвищення стабільності та точності класифікації [12].

- Багатошаровий перцептрон, який також застосовується для задач класифікації.

У цьому випадку дослідження показують, що підхід, зоснований на деревоподібній структурі чи нейронній мережі, демонструє кращі результати при визначенні рівня успішності.

Мета статті

Дослідження спрямоване на побудову та порівняння різних моделей прогнозування академічної успішності з метою визначення найбільш ефективного підходу до оцінювання якості освітнього процесу.

В роботі проводяться дослідження можливих варіантів застосування моделей машинного навчання, а саме: дерева рішень, випадковий ліс, нейронні мережі, лінійна регресія, варіантів компенсування дальтонізму.

Виклад основного матеріалу

Було визначено способи оцінки успішності студентів та потенційні моделі нейронних мереж, статистичних алгоритмів для порівняння ефективності при передбаченні успішності студентів. Було розроблено математичну модель для визначення успішності студентів. Для її перевірки використано відкритий набір даних Students Performance Factors [13], що містить показники, які потенційно впливають на підсумкову оцінку. Серед них: кількість навчальних годин на тиждень, відвідуваність занять, участь у додаткових заняттях, попередні результати, якість викладання, рівень доходу та освіти батьків, їхня залученість до освітнього процесу, вплив однолітків тощо. Цільовим параметром виступає екзаменаційна оцінка як інтегральний показник якості навчання.

Перед моделюванням дані було ретельно підготовлено:

- вилучено записи з пропущеними значеннями, щоб уникнути викривлення результатів;

- категоріальні показники, що відображають рівень або ступінь (наприклад, «низький», «середній», «високий»), перетворено на впорядковані числові значення; номінальні ознаки без порядкової природи (наприклад, тип закладу) не враховувалися;

- виконано нормалізацію ознак для приведення їх до спільного масштабу (за винятком цільової змінної для збереження інтерпретованості результату);

- усунуто аномальні спостереження;

- проведено кореляційний аналіз і виключено змінні, що не демонстрували статистично значущого зв'язку з підсумковою оцінкою.

Для класифікації оцінки були розбиті на групи. Високі оцінки (більше 80) мали дуже маленьку кількість для навчання, тому визнані, як аномальні, тому для аналізу оцінки розбиті на рівні групи до 60 («Very low»), від 60 до 67 («Low»), від 67 до 73 («Medium»), від 73 до 80 («Good»).

Датасет розділено на навчальну групу та тестувальну. Після навчання було здійснено передбачення на основі тестувальної вибірки.

На рисунку 1 зображено графік лінійної регресії, де показано відповідність передбачених значень оригінальним. Зеленим кольором позначено найвищу точність моделі, а градація від зеленого кольору показує

ступінь похибки. Як видно, найбільша від'ємна похибка складає -3 (синій колір), а найбільша позитивна похибка сягає 5 (блідий зелено-жовтий колір). По графіку можна оцінити кількість відхилень, і як видно, є багато занижень оцінок.

Тобто модель схильна до невеликих похибок у вузькому діапазоні, що є прийнятним для формування рейтингів та глибокого аналізу якості навчання.

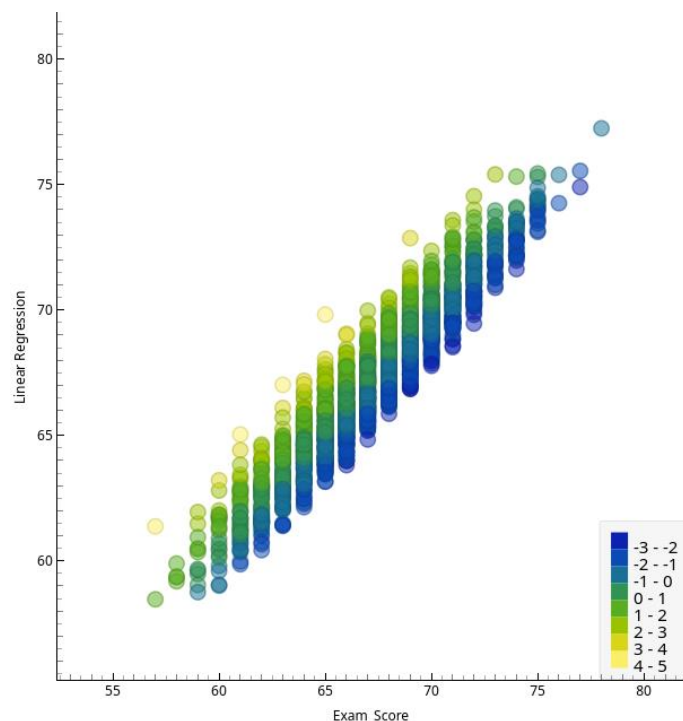


Рис. 1 – Графік лінійної регресії

Результати якості моделей для регресійного аналізу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1
Порівняння моделей для регресійного аналізу

Параметри / Моделі	Лінійна регресія	Багато шаровий перцептрон
R2 – Коефіцієнт детермінації	0.974	0.949
MAPE – Середнє абсолютне відсоткове відхилення	0.009	0.006
MAE – Середня абсолютна похибка	0.428	0.57
RMSE – корінь від MSE	0.531	0.738
MSE – Середньоквадратична помилка	0.282	0.545

Як видно, обидві моделі ефективні для передбачення, але точність має велике значення тут, тому лінійна регресія є ефективнішою. Завдяки високій

точності та простішій конфігурації порівняно зі складними алгоритмами, регресійна модель є оптимальною для впровадження в системи освітньої аналітики, де важливо отримати точний числовий результат

В порівнянні у таблиці 2 наведені результати якості моделей для класифікації.

Таблиця 2
Порівняння моделей класифікації

Параметри / Моделі	Дерево рішень	Випадковий ліс	Багатошаровий перцептрон
PREC – Точність серед позитивних випадків	0.802	0.881	0.919
CA – Точність моделі	0.832	0.874	0.919
RECALL – чутливість	0.572	0.575	0.919
F1 – ідеальна влучність та повнота	0.668	0.696	0.918

У задачах класифікації за рівнями успішності, згідно з результатами, наведеними у таблиці 2, більш високі результати показує багаторівневий перцептрон. Дана модель продемонструвала точність та чутливість (RECALL) на рівні 0,919, що суттєво випереджає дерево рішень (0,832) та випадковий ліс (0,874).

На рисунку 2 наведено дерево рішень. Побудоване дерево рішень демонструє чітку ієрархію впливу ознак на прогнозований результат. Найбільш інформативним атрибутом виступає Attendance, який формує кореневий поділ вибірки, що свідчить про його

визначальний вплив на цільову змінну. Подальші розгалуження відбуваються переважно за ознаками Hours_Studied та Previous_Scores, що підтверджує логічну залежність результату від інтенсивності навчання та попередньої академічної підготовки. У правій гілці дерева ($\text{Attendance} > 82$) спостерігається стабільно вища частка позитивного класу (до 87,5%), що вказує на сильний позитивний зв'язок між високою відвідуваністю та досягненням результату 67–73. У лівій частині дерева ($\text{Attendance} \leq 82$) переважає клас 61–67, що додатково підтверджує вагомість цієї ознаки.

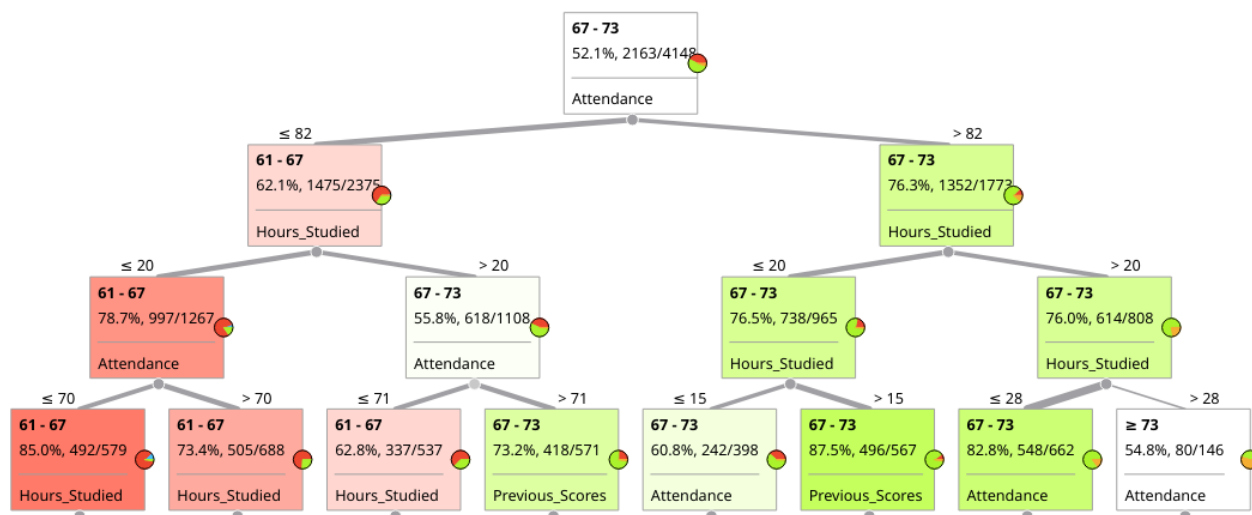


Рис. 2 – Дерево рішень для передбачення класу оцінки

Отримані метрики якості моделі свідчать про її помірно високу ефективність. Загальна точність ($CA = 0,832$) вказує на достатньо стабільну класифікацію в межах вибірки, а значення $PREC = 0,802$ підтверджує високу точність прогнозування позитивного класу. Водночас чутливість ($RECALL = 0,572$) є нижчою, що означає часткову втрату позитивних випадків під час класифікації. Значення $F1 = 0,668$ відображає компроміс між точністю та повнотою і свідчить про збалансованість моделі без суттєвого переобучення. Таким чином, модель є інтерпретованою та придатною для пояснювального аналізу факторів впливу, однак для підвищення виявлення позитивних випадків доцільним є подальше налаштування параметрів або балансування класів.

Як видно, нейронна мережа справляється краще за класичні дерева рішень.

На рисунку 3 зображено відповідність початкової та прогнозованої оцінки. Чим більше відхилення, тим

світліше колір групи. Як видно, реальні оцінки дуже часто відповідають прогнозованим.

Аналізуючи отримані результати можна помітити, що скупчення точок розташовано в зонах, де фактичний бал відповідає прогнозованому інтервалу (61–67, 67–73, ≥ 73). Оскільки основна маса студентів у вибірці зосереджена в інтервалах (61–67, 67–73) це вказує на те, що у виборці більшість студентів середнього рівня успішності, саме тому прогноз стабільний саме для цих категорій. В класифікації наявні точки поза головною діагоналлю (наприклад, фактичний бал 67–73 при прогнозі 61–67), що вказує на помилки класифікації. Невелика кількість таких помилок спостерігається переважно на межах інтервалів, що є типовим для багатокласової класифікації. Проте їхня кількість є відносно невеликою, що свідчить про високу узгодженість моделі з реальними даними та підтверджує класифікаційну здатність. Тобто можна зробити висновок що нейронна мережа справляється з задачею класифікацією студентів за рівнями успішності.

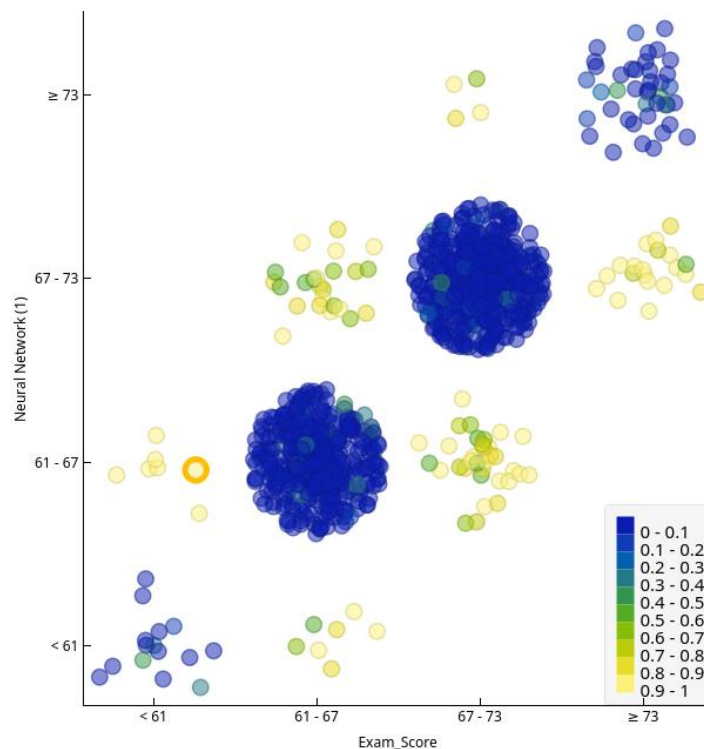


Рис. 3 – Графік відповідності прогнозованих нейронною мережею значень оригінальним

Аналізуючи результати класифікації методом дерева рішень (Random Forest), можна побачити відносно помірні результати, що помітно поступаються нейронним мережам. У задачі регресії нейронна мережа теж показує високу точність, достатню для успішних передбачень, проте лінійна регресія при використанні простішої конфігурації має точність вищу, через що вона виграє у більшості критеріїв, таких як швидкість, простота і сама точність.

Висновки

Процес вибору оптимальних методів для передбачення результатів семестрового контролю студентів безпосередньо залежить від конкретної мети дослідження та формату, у якому потрібно отримати прогноз.

У ситуаціях, коли необхідно встановити точну кількісну оцінку, раціональним вибором є використання моделей лінійної регресії. Порівняно зі складними нейронними мережами, регресійні моделі є значно швидшими у розрахунках та простішими в реалізації. Окрім того, у певних ситуаціях регресійні моделі здатні демонструвати навіть вищу ефективність, забезпечуючи меншу похибку при визначенні конкретних балів.

В свою чергу нейронні мережі показують високу точність при розподілі студентів по рівнях, модель демонструє при цьому високу точність та збалансованість та здатність виявити складні закономірності в даних.

Хоча нейронні мережі, а саме багатошаровий перцептрон зазвичай демонструють вищу точність прогнозування (0,919 проти 0,832 у дерева рішень), дерева

рішень все одно залишаються конкурентоспроможними для поставленої задачі оцінки успішності студентів. Перевагою дерев рішень є подальша можливість побудови більш складних ансамблевих моделей, таких як випадковий ліс. Це дозволить ще більше підвищити стабільність та точність результатів.

Результати проведеного дослідження показують, що поєднання регресійних моделей та нейронних мереж є потужним фундаментом для створення всебічної системи сучасної освітньої аналітики. Оскільки впровадження таких прогнозних моделей в освітній процес дозволяє своєчасно виявляти студентів групи ризику, коригувати їхні індивідуальні траєкторії та об'єктивізувати систему оцінювання, дотримуючись принципів академічної доброчесності.

Перелік використаних джерел

- [1] Students' class performance prediction using machine learning classifiers / A. Ahmed et al. *Quaid-e-Awam University Research Journal of Engineering Science & Technology*. 2021. Vol. 19(1). Pp. 112–121. DOI: <https://doi.org/10.52584/grj.1901.16>.
- [2] Exploring Weka and Python for educational data mining: Naïve Bayes vs. J48 / Sheikh T., Saha R., Jahan N., Al Mamun A. *Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Computational Systems (ICMCSI)*, Lalitpur, Nepal, 18-19 January 2024. Pp. 470–475. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMCSI61536.2024.00074>.

- [3] Interpreting the machine learning approaches to predict CGPA of the university students / R. Paul et al. *TEM Journal*. 2025. Vol. 14(4). Pp. 3438–3447. DOI: <https://doi.org/10.18421/TEM144-50>.
- [4] Pehlivanova T., Nedeva V. Attributes selection using machine learning for analysing students' dropping out of university: a case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1031. Article 012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1031/1/012055>.
- [5] Predicting Student Performance Using Random Forest Algorithm / R. Wania et al. *International Conference on Innovations and Trends in Engineering Technologies*, Biel, Switzerland, 25–26 November 2025. Vol. 01, no. 01. Pp. 01–02. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15704741>.
- [6] Atokolo N. C. Design and implementation of students academic performance prediction model using decision tree classifiers : Project work submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of a Bachelor of Science (B.Sc.) degree in Computer Science. Benin City : Benson Idahosa University, 2021. 78 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20977.04962/1>.
- [7] Нікіфоров Р. О., Ткаченко Л. А. Моделювання навчальних результатів студентів із використанням алгоритмів машинного навчання. *Наукові записки*. 2025. № 162. С. 21–35. DOI: <https://doi.org/10.31392/NZ-udu-162.2025.03>.
- [8] Прогнозування залученості користувачів освітніх вебплатформ за допомогою алгоритмів машинного навчання / Лях І., Дудник В., Ціпіню Ю., Ціпіню А. *Науковий вісник Ужгородського університету*. Серія: Математика і інформатика. 2025. Вип. 46. С. 218–225. DOI: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.46\(1\).218-225](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.46(1).218-225).
- [9] Regression analysis of multivariate recurrent event data allowing time-varying dependence with application to stroke registry data / W. Li et al. *Statistical Methods in Medical Research*. 2024. Vol. 33, no. 2. Pp. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.1177/09622802231226330>.
- [10] Поркуян О. В., Самойлова Ж. Г. Моделювання лінійної нейронної мережі з зворотним поширенням помилки для основних каналів керування реактором синтезу оцтової кислоти. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2023. № 3(279). С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-31-36>.
- [11] Scalable random forest with data-parallel computing / Vázquez-Novoa F., Conejero J., Tatu C., Badia R. M. *Communications in Computer and Information Science*. 2023. Vol. 1858. Pp. 396–411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39698-4_27.
- [12] Scornet E., Biau G., Vert J.-P. A Random Forest Guided Tour: Non-expert infers the forest from interconnected trees. *Annals of Statistics*. 2022. Vol. 50(6). Pp. 3861–3885. DOI: <https://doi.org/10.1214/22-AOS2231>.
- [13] Dataset «Student Performance Factors». URL: <https://www.kaggle.com/datasets/lainguy123/student-performance-factors> (дата звернення: 15.12.2025).

A COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR DECISION SUPPORT IN PREDICTING ACADEMIC PERFORMANCE

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 ;
Pertsev Ye.A.	M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: e-mail: pertsev_v_a@students.pstu.edu

In the modern conditions of digitalization of education, the issue of objective assessment of learning outcomes and timely identification of students who need additional support is of particular importance. This work considers the possibilities of using machine learning algorithms to predict the final results of semester control. The relevance of the study is due to the need for tools for objectifying assessment and timely identification of risks of failure to adjust the individual educational trajectory. The study is aimed not only at obtaining an accurate numerical score, but also at determining the level of student success in a generalized categorical form (from «Very low» to «Good»), which allows for a deeper analysis of the quality of the educational process and timely adjustment of the individual learning trajectory. The work uses the «Students Performance Factors» data set, which includes indicators of class attendance, intensity of study, previous academic training, and socio-economic factors. Data preparation included anomaly removal, feature normalization, and correlation analysis to select the most informative parameters. For the experimental study, linear regression, multilayer perceptron (neural network), decision trees, and random forest were used. The models were evaluated using R^2 and MAE metrics for regression tasks and accuracy for classification tasks. The results showed that linear regression was the most appropriate for predicting the exact final score, demonstrating high accuracy and ease of interpretation. At the same

time, in the task of distributing students by achievement levels, the best results were obtained using a neural network. Decision tree analysis confirmed the important role of attendance as a key factor in academic success. The results obtained show that the choice of method should depend on the forecast format: for quantitative assessments, it is advisable to use regression, and for qualitative separation of students by levels, neural networks. The study opens up prospects for implementing educational analytics tools to improve learning efficiency.

Keywords: machine learning; regression; decision trees; neural networks; performance evaluation; academic performance.

References

- [1] A. Ahmed, K. Kumar, M. Khuhro, A. Wagan, I. Halepoto, and R. Hussain, "Students' class performance prediction using machine learning classifiers," *Quaid-e-Awam University Research Journal of Engineering Science & Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 112–121, 2021. doi: [10.52584/qrj.1901.16](https://doi.org/10.52584/qrj.1901.16).
- [2] T. Sheikh, R. Saha, N. Jahan, and A. Al Mamun, "Exploring Weka and Python for educational data mining: Naïve Bayes vs. J48," in *Proc. of the Int. Conf. on Machine Learning and Computational Systems (ICMCSI)*, Lalitpur, Nepal, January 18–19, 2024, pp. 470–475. doi: [10.1109/ICMCSI61536.2024.00074](https://doi.org/10.1109/ICMCSI61536.2024.00074).
- [3] R. Paul, S. Hussain, K. Kannan, B. Mondal, A. Baruah, and S. Gaftandzhieva, "Interpreting the machine learning approaches to predict CGPA of the university students," *TEM Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 3438–3447, 2025. doi: [10.18421/TEM144-50](https://doi.org/10.18421/TEM144-50).
- [4] T. Pehlivanova, and V. Nedeva, "Attributes selection using machine learning for analysing students' dropping out of university: A case study," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1031, Art. no. 012055, 2021. doi: [10.1088/1757-899X/1031/1/012055](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1031/1/012055).
- [5] R. Wania, S. Mukherjee, S. Mondal, S. Mukherjee, and S. Hazra, "Predicting student performance using random forest algorithm," in *Proc. of the Int. Conf. on Innovations and Trends in Engineering Technologies*, Biel, Switzerland, November 25–26, 2025, vol. 01, no. 01, pp. 01–02. doi: [10.5281/zenodo.15704741](https://doi.org/10.5281/zenodo.15704741).
- [6] N. C. Atokolo, "Design and implementation of students academic performance prediction model using decision tree classifiers," B.Sc. thesis, Dept. Computer Science, Benson Idahosa University, Benin City, Nigeria, 2021. doi: [10.13140/RG.2.2.20977.04962/1](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20977.04962/1).
- [7] R. O. Nikiforov, and L. A. Tkachenko, "Modeliuvannia navchalnykh rezul'tativ studentiv iz vykorystanniam alhorytmiv mashynnoho navchannia" ["Modeling students' learning results using machine learning algorithms"], *Naukovi zapysky – Scientific Notes*, № 162, pp. 21–35, 2025. doi: [10.31392/NZ-udu-162.2025.03](https://doi.org/10.31392/NZ-udu-162.2025.03). (Ukr.)
- [8] I. Liakh, V. Dudnyk, Yu. Tsipino, and A. Tsipino, "Prohnozuvannia zaluchenosti korystuvachiv osvitykh vebplatform za dopomohoiu alhorytmiv mashynnoho navchannia" ["Forecasting user engagement in educational web platforms using machine learning algorithms"], *Naukovi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya: Matematyka i informatyka – Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series of Mathematics and Informatics*, no. 46, pp. 218–225, 2025. doi: [10.24144/2616-7700.2025.46\(1\).218-225](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.46(1).218-225). (Ukr.)
- [9] W. Li et al., "Regression analysis of multivariate recurrent event data allowing time-varying dependence with application to stroke registry data," *Statistical Methods in Medical Research*, vol. 33, no. 2, pp. 309–320, 2024. doi: [10.1177/09622802231226330](https://doi.org/10.1177/09622802231226330).
- [10] O. V. Porkuyan, and Zh. G. Samojlova, "Modeliuvannia liniinoi neironnoi merezhi z zvorotnym poshyrenniam pomylky dlia osnovnykh kanaliv keruvannia reaktorom syntezu otstovoi kysloty" ["Modeling of a linear neural network with inverse error propagation for the main channels of acetic acid synthesis reactor control"], *Visnyk Skhidnoukrajinskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, № 3(279), pp. 31–36, 2023. doi: [10.33216/1998-7927-2023-279-3-31-36](https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-31-36). (Ukr.)
- [11] F. Vázquez-Novoa, J. Conejero, C. Tatu, and R. M. Badia, "Scalable random forest with data-parallel computing," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1858, pp. 396–411, 2023. doi: [10.1007/978-3-031-39698-4_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39698-4_27).
- [12] E. Scornet, G. Biau, and J.-P. Vert, "A random forest guided tour: Non-expert infers the forest from interconnected trees," *Annals of Statistics*, vol. 50, no. 6, pp. 3861–3885, 2022. doi: [10.1214/22-AOS2231](https://doi.org/10.1214/22-AOS2231).
- [13] "Student Performance Factors," Kaggle, [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/lainguyun123/student-performance-factors>.

Стаття надійшла 03.02.2026

Стаття прийнята 01.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Проніна О. І., Перцев Є. А. Порівняльний аналіз алгоритмів машинного навчання в задачах підтримки прийняття рішень щодо академічної успішності. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359776>.

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ЗМІСТУ МЕДИЧНИХ АУДІОЗАПИСІВ
ДЛЯ ЗАПОВНЕННЯ МЕДИЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ**Затуловський
Г.А.**магістр, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
e-mail: h.zatulovskyi.zk41mp.fbmi25@iitl.kpi.ua;**Піднебесна Г.А.**канд. техн. наук, ст. викладач, НТУУ «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 ведення медичної документації лікарями, що є одним із найбільш трудомістких аспектів роботи лікаря в сучасній системі охорони здоров'я. Лікарі витрачають багато робочого часу на заповнення електронних медичних карток та іншої документації, що уповільнює та знижує якість медичної допомоги. Система автоматичної транскрипції та заповнення медичних форм усуває ці бар'єри, поєднуючи розпізнавання мовлення (ASR), вилучення сутностей (NER), генеративний аналіз (LLM) та процедурну валідацію. Метою роботи є підвищення швидкості та зручності ведення медичної документації за допомогою інтелектуальної системи автоматичної обробки аудіозаписів та напівавтоматичного заповнення стандартних форм медичних звітів. Об'єктом дослідження є процес ведення медичної документації під час консультації лікар-пацієнт. Предметом дослідження є методи автоматичної транскрипції медичних аудіозаписів та інтелектуального заповнення стандартизованих медичних форм на основі обробки природної мови. Практичне значення роботи полягає в можливості застосування отриманих результатів для підвищення ефективності медичної діагностики та обробки клінічних даних. Запропоновані методи можуть бути використані в медичних інформаційних системах для автоматизації аналізу даних, підтримки прийняття рішень та підвищення точності діагностичних процедур.

Ключові слова: транскрибація медичних аудіо; штучний інтелект; розпізнавання мовлення; обробка природної мови; медична документація; браузерне розширення.

Постановка проблеми

Адміністрування медичної документації є однією з найбільш гострих та часозатратних проблем у щоденній практиці лікаря. Численні дослідження вказують на тривожну тенденцію: медичні фахівці змушені приділяти значну частку свого робочого часу не пацієнту, а саме заповненню електронних карток та формуванню звітності. Такий дисбаланс, де адміністративні завдання починають переважати над клінічною взаємодією, є вкрай негативним. Ситуація додатково ускладнюється через невинне зростання загального навантаження на медичну систему та одночасне посилення регуляторних вимог до якості, повноти та деталізації медичних записів.

Вирішенням цієї проблеми є впровадження інтелектуальних систем, здатних автоматизувати перетворення усного мовлення лікаря та пацієнта в структуровані медичні записи. Поєднання технологій автоматичного розпізнавання мовлення (ASR) та генеративних мовних моделей (LLM) дозволяє створити інструмент, що забезпечує транскрибацію, витяг ключових клінічних сутностей та заповнення стандартизованих форм у реальному часі. Така система є необхідним кроком для цифрової трансформації медичної галузі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технології автоматичного розпізнавання мовлення. Автоматичне розпізнавання мовлення (Automatic Speech Recognition, ASR) є ключовою технологією для систем автоматизації медичної

документації. За останні роки відбувся значний прогрес у цій галузі завдяки розвитку глибокого навчання та трансформерних архітектур нейронних мереж [1]. Було оглянуто та проведено детальний аналіз їхніх переваг та недоліків декілька технологій, таких як OpenAI Whisper [2, 3], Google Cloud Speech-to-Text [4], Vosk [5], Microsoft Azure Speech Services [6]. Для системи було обрано Whisper Large v3 Turbo, оскільки вона забезпечує високу точність водночас для української мови та англійської, працює офлайн, що критично для конфіденційності медичних даних, та має оптимальний баланс між швидкістю й точністю. Крім того, модель є open-source, не потребує додаткового навчання й активно підтримується спільнотою.

Аналіз методів обробки природної мови. Після отримання текстового транскрипту з системи автоматичного розпізнавання мовлення постає задача структурування інформації та виділення ключових медичних сутностей. Ця задача є критичною для автоматичного заповнення медичних форм, оскільки неструктурований текст діалогу між лікарем та пацієнтом має бути перетворений у конкретні поля документа (ПІБ пацієнта, вік, діагноз, скарги, анамнез, призначення тощо).

Для вирішення цієї задачі застосовуються різні підходи, які можна умовно розділити на три категорії: класичні NER-моделі [7], генеративні LLM-моделі [8] та rule-based методи [9]. У розробленій нами системі для визначення медичних сутностей та структурування інформації з транскриптів використовується Google Gemini API (модель Gemini 2.0 Flash). Вибір цієї моделі

обґрунтований кількома факторами: Gemini демонструє відмінну підтримку української мови та здатність розуміти медичний контекст навіть у розмовному мовленні. Gemini підтримує генерацію структурованого JSON-виводу, що спрощує інтеграцію з медичними формами. Крім того, модель здатна до few-shot learning, тобто може навчитися витягувати необхідні поля на основі кількох прикладів у промпті, без потреби у великих анотованих датасетах.

Існуючі системи автоматизації медичної документації. На сучасному ринку представлена значна кількість рішень для автоматизації медичної документації, які відрізняються функціональністю, технологічним стеком, ціною політикою та географічним охопленням. Проаналізовано найбільш значущі системи, які представляють різні підходи до вирішення проблеми автоматизації медичного документообігу: Suki AI [10], Nuance Dragon Medical [11], DeepScribe.

Аналіз існуючих систем виявив наступні ключові обмеження, які обґрунтовують необхідність розробки власного рішення. По-перше, жодна з провідних міжнародних систем не підтримує українську мову на достатньому рівні для медичних застосувань, що робить їх непридатними для використання в українських медичних закладах без значних доопрацювань. По-друге, всі хмарні рішення передають медичні дані на сервери, розташовані за кордоном (переважно у США), що створює юридичні ризики та суперечить принципам збереження медичної таємниці.

Ці обмеження визначають основні вимоги до розробленої системи. Система має підтримувати українську мову на високому рівні, забезпечувати повністю локальну обробку даних для гарантування конфіденційності, використовувати open-source компоненти для мінімізації вартості, інтегруватися з українськими стандартами медичної документації [14] та застосовувати сучасні AI-технології для ambient documentation.

Мета статті

Метою роботи є підвищення ефективності документообігу в медичних закладах шляхом розробки та впровадження інформаційної системи для автоматизованої обробки аудіоданих консультацій та інтелектуального заповнення медичної звітності.

Об'єктом дослідження є процес ведення медичної документації під час консультацій лікаря з пацієнтом. Предмет дослідження це методи автоматичної транскрибації медичних аудіозаписів та інтелектуального заповнення стандартизованих медичних форм на основі обробки природної мови.

Виклад основного матеріалу

Архітектурні рішення системи. Розроблена інформаційна система для автоматичного заповнення медичних форм реалізована з використанням модульної архітектури, що забезпечує розділення функціональних обов'язків між компонентами та полегшує подальше

масштабування й підтримку системи. Вибір модульного підходу обумовлений необхідністю забезпечення гнучкості системи, можливості незалежного оновлення окремих компонентів без впливу на функціонування всієї системи в цілому, а також спрощення процесів тестування та налагодження окремих модулів.

Клієнтська частина системи реалізована у вигляді браузерного розширення для Google Chrome, що працює на платформі Google Meet. Розширення використовує Manifest V3 – найновішу специфікацію для розширень Chrome, яка забезпечує покращену безпеку та продуктивність. Вибір саме Manifest V3 був зумовлений тим, що це найсучасніший стандарт, який надає розширені можливості для роботи з медіапотоками, підвищені гарантії безпеки користувацьких даних та оптимізоване споживання системних ресурсів.

Використання ping-pong підходу для безперервного захоплення аудіопотоку з мінімальними втратами даних є особливістю розробленої системи. Це дозволяє уникнути втрати аудіоданих між послідовними фрагментами запису.

Модульна архітектура з чітким розділенням відповідальності між компонентами підвищує надійність і масштабованість системи: збій одного модуля не впливає на роботу всієї системи в цілому. Це забезпечує високий рівень відмовостійкості.

Серверна частина системи реалізована на базі FastAPI фреймворку, який забезпечує обробку аудіофайлів, їх транскрибацію та збереження результатів у базі даних. Архітектура серверної частини побудована за принципом шаблону проектування Facade (Фасад), що дозволяє приховати складність взаємодії між підсистемами за уніфікованим інтерфейсом. Це рішення суттєво спрощує інтеграцію серверу з клієнтською частиною системи та полегшує налагодження, тестування й подальший розвиток функціоналу. Використання патерну Facade дозволяє API-контролерам викликати високорівневі методи без необхідності розуміти внутрішню логіку роботи кожної підсистеми, що знижує зв'язаність між компонентами та підвищує загальну гнучкість архітектури.

Однією з ключових функцій серверної частини є асинхронна обробка аудіочанків, що надходять від клієнтської системи (розширення Google Meet). Асинхронність є критично важливою для забезпечення можливості обробки множини одночасних сесій запису від різних користувачів без блокування основного потоку виконання та з мінімальними затримками. Кожен аудіофрагмент обробляється незалежно від інших, що дозволяє системі працювати у режимі реального часу, обробляючи кілька потоків паралельно без взаємного впливу. Для цього використовується асинхронна функція (async def), яка гарантує ефективне використання ресурсів сервера навіть при великій кількості одночасних запитів, оскільки під час очікування завершення операцій введення-виведення процесор може перемикатися на обробку інших запитів.

Транскрибація виконується локально за допомогою моделі Whisper Large V3 Turbo (transcriber.py), що гарантує конфіденційність медичних даних і незалежність від зовнішніх сервісів. Модель завантажується з Hugging Face Hub і автоматично налаштовується під доступне обладнання. Такий підхід забезпечує баланс між швидкістю, точністю та безпекою даних.

Інтелектуальний аналіз з використанням LLM. Для автоматичного заповнення медичних форм на основі транскрибованого тексту використовується Google Gemini API через бібліотеку google-generativeai. Gemini 2.0 Flash обрано як оптимальний вибір завдяки його високій швидкості обробки запитів (до 2 секунд на типову медичну форму), розширеному контекстному вікну (1 мільйон токенів), що дозволяє обробляти навіть дуже довгі транскрипти консультацій, та відмінній якості розуміння медичної термінології українською мовою. Gemini 2.0 Flash демонструє гарні результати в задачах структурованого витягу інформації та генерації JSON, що критично важливо для точного заповнення форм.

Аналізатор форм побудований за принципом шаблонного промптінгу з використанням Jinja2: для кожного типу медичної форми створено окремий детальний шаблон промпу, що містить опис структури форми, приклади коректного заповнення, правила валідації та інструкції щодо обробки випадків, коли певна інформація відсутня в транскрипті. Використання низької температури (0.1) забезпечує детерміновану та передбачувану поведінку моделі, мінімізуючи галюцинації та забезпечуючи стабільність результатів між запусками.

Після отримання даних від Gemini API система проходить критично важливий етап валідації та нормалізації, щоб забезпечити коректність заповнення форм та відповідність медичним стандартам. Валідатор виконує комплексну перевірку отриманих даних за кількома критеріями: перевіряє наявність усіх обов'язкових полів, які визначені в конфігурації форми, контролює формат спеціальних полів, таких як телефонні номери (маска +380XXXXXXXXXX), дати (формат ДД.ММ.РРРР), реєстраційні номери облікових карток платників податків та інші ідентифікатори, а також перевіряє відповідність значень полів типу "select" допустимим опціям зі словника, щоб уникнути введення некоректних або нестандартизованих значень. У разі виявлення невідповідностей система автоматично виконує нормалізацію даних до стандартного формату: додає коди країн до телефонних номерів, приводить дати до єдиного формату, видаляє зайві пробіли та спеціальні символи з текстових полів.

Для забезпечення безперервного захоплення аудіопотоку під час медичних консультацій було розроблено спеціалізоване розширення для браузера Chrome, яке інтегрується з платформою Google Meet та надає можливість автоматичного запису діалогів. Архітектура розширення побудована за принципом чіткого розділення відповідальності між компонентами, де

кожен модуль виконує свою специфічну функцію: service worker (background.js) координує загальну роботу розширення та управляє його життєвим циклом, offscreen document здійснює безпосереднє захоплення та обробку аудіопотоків з використанням Web Audio API, а content script забезпечує візуальну взаємодію з інтерфейсом Google Meet та відображення транскрипції в реальному часі. Така архітектура повністю відповідає вимогам Manifest V3, останньої версії специфікації Chrome Extensions, і забезпечує стабільну роботу навіть при тривалих сеансах запису, що є критично важливим для медичних консультацій, які часто тривають від 30 хвилин до години і більше.

Інтерфейс розширення інтегрується безпосередньо в сторінку Google Meet у вигляді плаваючої панелі, розташованої в лівому нижньому куті екрана. Вона забезпечує зручний доступ до елементів управління без перекриття основної зони відеоконференції з відображенням учасників.

Для забезпечення зручної та ефективної роботи медичного персоналу з накопиченими транскриптами консультацій та автоматичного заповнення різноманітних медичних форм було розроблено інтуїтивно зрозумілий веб-додаток на базі сучасного фреймворку Streamlit, який поєднує простоту використання з потужним функціоналом обробки даних. Інтерфейс системи логічно структурований та складається з двох основних режимів роботи, між якими користувач може легко перемикатися: режим перегляду та редагування існуючих транскриптів з можливістю додавання голосових нотаток лікаря, а також режим автоматичного заповнення медичних форм на основі інтелектуального аналізу транскрибованих консультацій з використанням можливостей великих мовних моделей.

Головна сторінка інтерфейсу системи розроблена з акцентом на функціональність та зручність використання. Інтерфейс містить бічну панель навігації з інтуїтивно зрозумілими елементами вибору режиму роботи та потужними інструментами фільтрації записів для швидкого пошуку потрібних консультацій серед великої кількості збережених даних. Центральна частина екрана відображає основну таблицю з даними, завантаженими з бази даних MySQL, де кожен рядок представляє окрему медичну консультацію з основними метаданими: скороченим ідентифікатором запису, іменами пацієнта та лікаря, коротким фрагментом транскрипту для попереднього перегляду та датою проведення консультації. Ця таблиця є інтерактивною та дозволяє користувачу швидко переглядати доступні записи, сортувати їх за різними критеріями та вибирати конкретний запис для детального перегляду або редагування одним кліком миші. Реалізовано також можливість запису додаткової інформації лікарем (призначені ліки, діагноз, симптоми, тощо).

Після завершення процесу транскрибації, який зазвичай займає лише кілька секунд завдяки використанню оптимізованої turbo версії моделі Whisper, система автоматично відображає розпізнаний текст у

спеціальному текстовому полі під модулем запису аудіо. Це дозволяє лікарю одразу перевірити якість розпізнавання, переконатися що вся важлива інформація була коректно розпізнана, і при необхідності відредагувати текст перед збереженням.

Режим автоматичного аналізу транскриптів консультацій є найбільш інноваційною та технологічно складною функціональною можливістю всієї медичної інформаційної системи, що забезпечує інтелектуальну обробку неструктурованих текстів діалогів та автоматичне заповнення медичних форм різних типів з

мінімальним втручанням користувача. Підсистема автоматичного аналізу побудована на основі сучасної модульної архітектури з чітким розділенням відповідальності між компонентами та використанням принципів об'єктно-орієнтованого проектування. На загальній схемі взаємодії компонентів підсистеми, представлено інтерфейс вибору форми, модуль завантаження конфігурацій, клієнт Gemini API для аналізу тексту, валідатор отриманих даних та генератор вихідних документів у форматах DOCX та JSON (рис. 1).

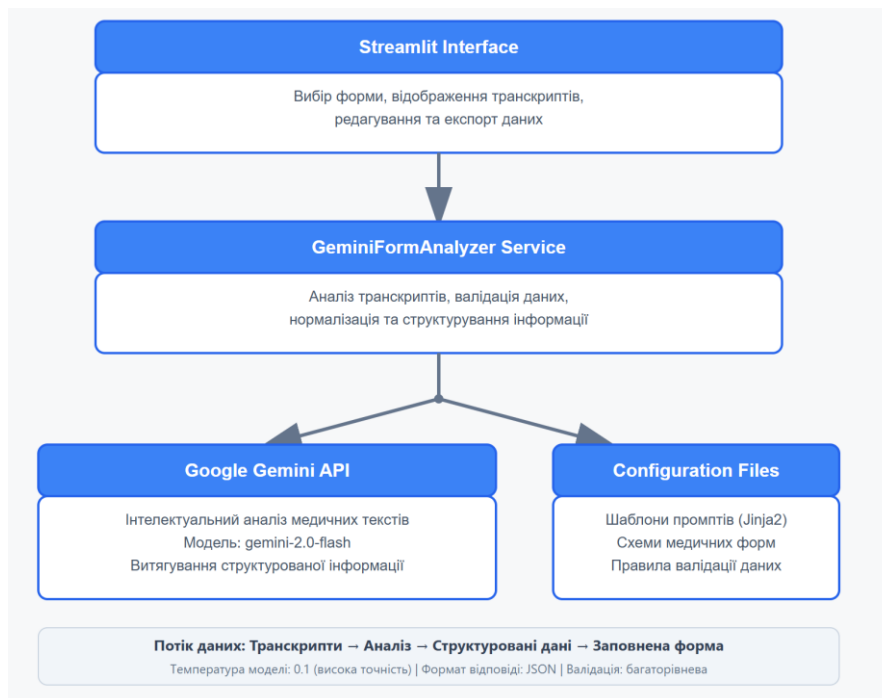


Рис. 1 – Архітектура підсистеми автоматичного аналізу

В поточній версії системи підтримуються різні типи форм медичної документації [13], включаючи форму 025/о «Медична карта амбулаторного хворого», форму 027/о «Виписка з медичної карти амбулаторного хворого» та інші стандартизовані форми МОЗ України, при цьому архітектура системи дозволяє легко додавати нові типи форм шляхом створення відповідних конфігураційних файлів та шаблонів промптів без необхідності модифікації основного програмного коду (рис. 2).

Формат JSON-файлу створюється одночасно з DOCX та містить абсолютно ідентичні дані, але представлені у машиночитаному форматі з чіткою ієрархічною структурою, де кожне поле форми має відповідний ключ та типізоване значення.

Вибір форми

Оберіть форму:

(025/o) - Медична карта амбул... ▼

(025/o) - Медична карта амбулато...

(003/o) - Медична карта стаціонар...

(027/o) - Виписка із медичної карт...

(063/o) - Карта профілактичних щ...

(086/o) - Медична довідка для под...

Рис. 2 – Приклад модуля для обрання медичної форми

Він особливо корисний для автоматизованої інтеграції з електронними медичними картками [16], системами електронного документообігу медичних закладів (рис. 3), регіональними та національними базами даних пацієнтів, а також для передачі даних у ЕСОЗ (Електронну систему охорони здоров'я України) через стандартизовані API без необхідності ручного перенесення інформації.

Рис. 3 – Приклад збереження у форматі DOCX

Висновки

Виконана робота направлена на вирішення гострої проблеми, пов'язаної з надмірним адміністративним навантаженням на медичний персонал в Україні, що призводить до значних часових витрат та ризиків помилок при ручному веденні документації. Головна мета полягала у створенні інтелектуальної програмної системи, здатної автоматично перетворювати аудіозаписи лікарських консультацій на структуровану звітність, адаптовану до національних стандартів.

Поставлена мета досягнута шляхом розробки модульної архітектури, яка поєднує клієнтську частину на базі браузерного розширення та високопродуктивний серверний обробник. Ключовою технічною особливістю є реалізація механізму конфіденційного та безперервного захоплення аудіопотоку завдяки унікальній «ping-pong» архітектурі. Забезпечено транскрибацію української медичної термінології через використання локально розгорнутої моделі Whisper Large v3 Turbo, що є фундаментальною перевагою над

хмарними іноземними аналогами та гарантує повну конфіденційність даних пацієнтів.

Важливим функціональним модулем системи є реалізація семантичного аналізу, який інтегрує генеративні можливості Gemini API з динамічними шаблонами Jinja2, дозволяє надійно витягувати з транскрипту ключові сутності (діагноз, скарги, анамнез) та автоматично формувати валідовані документи у форматі DOCX для офіційного використання, а також JSON-файли для інтеграції з існуючими МІС. Проведені обчислювальні експерименти повністю підтвердили як високу якість розпізнавання, так і успішне виконання всіх вимог, визначених технічним завданням.

Розроблена система має чіткі конкурентні переваги: вона є адаптованою до мовного та нормативного середовища України, забезпечує безпрецедентний рівень конфіденційності даних завдяки локалізації процесу транскрибації та прямо генерує звіти за національними стандартами.

Перелік використаних джерел

- [1] ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2015. 29 p.
- [2] LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. Pp. 436–444. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- [3] Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision / A. Radford et al. arXiv preprint. arXiv:2212.04356. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04356>.
- [4] OpenAI Whisper Model Card. URL: <https://github.com/openai/whisper/blob/main/model-card.md> (дата звернення 07.11.2025).
- [5] Google Cloud Speech-to-Text Documentation. URL: <https://cloud.google.com/speech-to-text/docs> (дата звернення 07.11.2025).
- [6] Vosk Offline Speech Recognition API. URL: <https://alphacephei.com/vosk/> (дата звернення 10.11.2025).
- [7] Jensen P. B., Jensen L. J., Brunak S. Mining electronic health records: towards better research applications and clinical care. *Nature Reviews Genetics*. 2012. Vol. 13. Pp. 395–405. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrg3208>.
- [8] Yadav V., Bethard S. A Survey on Recent Advances in Named Entity Recognition from Deep Learning models. arXiv preprint. arXiv:1910.11470. 2019. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.11470>.
- [9] LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models / H. Touvron et al. arXiv preprint. arXiv:2302.13971. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.13971>.
- [10] ICD-11: International Classification of Diseases 11th Revision. World Health Organization, 2024. URL: <https://icd.who.int/en/> (дата звернення 04.11.2025)

- [11] Suki AI Platform Overview. URL: <https://www.suki.ai/> (дата звернення 15.11.2025)
- [12] DeepScribe: Ambient AI Scribe for Healthcare. 2024. URL: <https://www.deepscribe.ai/> (дата звернення 16.11.2025)
- [13] Електронна система охорони здоров'я в Україні. URL: <https://ehealth.gov.ua/> (дата звернення 16.11.2025)
- [14] Про затвердження форм первинної облікової документації та Інструкцій щодо їх заповнення, що використовуються у закладах охорони здоров'я незалежно від форми власності та підпорядкування : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.02.2012 № 110.

MEDICAL AUDIO RECORDING CONTENT RECORDING SYSTEM FOR COMPLETING MEDICAL DOCUMENTATION

- | | |
|-------------------------|--|
| Zaturovskyi H.A. | <i>M.Sc., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, e-mail: h.zatulovskyi.zk41mp.fbmi25@iit.kpi.ua;</i> |
| Pidnebesna H.A. | <i>PhD (Engineering), senior lecturer, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv; 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</i> |

Maintaining medical documentation is one of the most labor-intensive aspects of a doctor's work in the modern healthcare system. Doctors spend a lot of working time filling out electronic medical records and other documentation, which slows down and reduces the quality of medical care. In most medical institutions in Ukraine, documentation is done manually, which creates a significant routine workload, increases the risk of errors, and distracts the doctor from interacting with the patient. A system for automatic transcription and medical form filling removes these barriers by combining speech recognition (ASR), entity extraction (NER), generative analysis (LLM), and procedural validation. The aim of the work is to improve the speed and convenience of medical documentation through an intelligent system for automatic processing of audio recordings and semi-automatic filling of standard medical report forms. Object of research is the process of medical documentation during doctor-patient consultations. Subject of research are methods for automatic transcription of medical audio recordings and intelligent filling of standardized medical forms based on natural language processing. To achieve the research goal, a detailed analysis of relevant modern technologies was conducted. The developed information system for automatic filling of medical forms is implemented using a modular architecture, which ensures the separation of functional responsibilities between components and facilitates further scaling and support of the system. The choice of a modular approach is due to the need to ensure system flexibility, the possibility of independent updating of individual components without affecting the functioning of the entire system as a whole, as well as simplifying the testing and debugging processes of individual modules. Modular architecture with a clear separation of responsibilities between components increases the reliability and scalability of the system: the failure of one module does not affect the operation of the entire system as a whole. This provides a high level of fault tolerance. The client part of the system is implemented as a browser extension for Google Chrome, running on the Google Meet platform. The extension uses Manifest V3, the latest specification for Chrome extensions, which provides improved security and performance. The use of a ping-pong approach for continuous audio stream capture with minimal data loss is a feature of the developed system. This avoids the loss of audio data between consecutive recording fragments. The goal was achieved by developing a modular architecture that combines a client part based on a browser extension and a high-performance server processor. The key technical feature is the implementation of a mechanism for confidential and continuous audio stream capture thanks to a unique «ping-pong» architecture. Transcription of Ukrainian medical terminology is provided through the use of a locally deployed Whisper Large v3 Turbo model, which is a fundamental advantage over cloud-based foreign analogues and guarantees complete confidentiality of patient data. An important functional module of the system is the implementation of semantic analysis, which integrates the generative capabilities of the Gemini API with dynamic Jinja2 templates, allows you to reliably extract key entities (diagnosis, complaints, anamnesis) from the transcript and automatically generate validated documents in DOCX format for official use, as well as JSON files for integration with existing MIS. The conducted computational experiments fully confirmed both the high quality of recognition and the successful implementation of all requirements specified in the technical specifications. The developed system has clear competitive advantages: it is adapted to the linguistic and regulatory environment of Ukraine, provides an unprecedented level of data confidentiality due to the localization of the transcription process, and directly generates reports according to national standards. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results to increase the efficiency of medical diagnostics and clinical data processing. The proposed methods can be used in medical

information systems for automating data analysis, supporting decision-making, and improving the accuracy of diagnostic procedures. The developed system has clear competitive advantages: it is adapted to the linguistic and regulatory environment of Ukraine, provides an unprecedented level of data confidentiality due to the localization of the transcription process, and directly generates reports according to national standards.

Keywords: medical audio transcription; artificial intelligence; speech recognition; natural language processing; medical documentation; browser extension.

References

- [1] *Quality Management Systems – Requirements*, ISO 9001:2015, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- [2] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, pp. 436–444, 2015. doi: 10.1038/nature14539.
- [3] A. Radford, J. W. Kim, T. Xu, G. Brockman, C. McLeavey, and I. Sutskever, “Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision,” 2022, *arXiv:2212.04356*. doi: 10.48550/arXiv.2212.04356.
- [4] OpenAI Whisper Model Card. [Online]. Available: <https://github.com/openai/whisper/blob/main/model-card.md>. Accessed on: November 07, 2025.
- [5] Google Cloud Speech-to-Text Documentation. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/speech-to-text/docs>. Accessed on: November 07, 2025.
- [6] Vosk Offline Speech Recognition API. [Online]. Available: <https://alphacephei.com/vosk/>. Accessed on: November 10, 2025.
- [7] P. B. Jensen, L. J. Jensen, and S. Brunak, “Mining electronic health records: towards better research applications and clinical care,” *Nature Reviews Genetics*, vol. 13, pp. 395–405, 2012. doi: 10.1038/nrg3208.
- [8] V. Yadav, and S. Bethard, “A Survey on Recent Advances in Named Entity Recognition from Deep Learning models,” 2019, *arXiv:1910.11470*. doi: 10.48550/arXiv.1910.11470.
- [9] H. Touvron et al., “LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models,” 2023, *arXiv:2302.13971*. doi: 10.48550/arXiv.2302.13971.
- [10] ICD-11: International Classification of Diseases 11th Revision. World Health Organization, 2024. [Online]. Available: <https://icd.who.int/en/>. Accessed on: November 04, 2025.
- [11] Suki AI Platform Overview. [Online]. Available: <https://www.suki.ai/>. Accessed on: November 15, 2025.
- [12] DeepScribe: Ambient AI Scribe for Healthcare. 2024. [Online]. Available: <https://www.deepscribe.ai/>. Accessed on: November 16, 2025.
- [13] Електронна система охорони здоров'я в Україні. [Online]. Available: <https://ehealth.gov.ua/>. Accessed on: November 16, 2025.
- [14] *Pro zatverdzhennia form pervynnoi oblikovoi dokumentatsii ta Instruksii shchodo yikh zapovnennia, shcho vykorystovuiutsia u zakladakh okhorony zdorovia nezalezno vid formy vlasnosti ta pidporiadkuvannia* [On Approval of Forms of Primary Accounting Documentation and Instructions for Their Completion Used in Health Care Institutions Regardless of Ownership and Subordination], Order of the Ministry of Health of Ukraine no. 110, Feb. 14, 2012. (Ukr.)

Стаття надійшла 28.11.2025

Стаття прийнята 23.12.2025

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Затуловський Г. А., Піднебесна Г. А. Система розпізнавання змісту медичних аудіо-записів для заповнення медичної документації. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359778>.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОННОГО НЕЛІНІЙНОГО ОСЦИЛЯТОРА ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ У ЗАДАЧАХ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

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;

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

Сучасні системи захисту інформації та захищені канали зв'язку потребують джерел високої ентропії та стійкості до передбачуваності. У статті запропоновано підхід до моделювання та програмної реалізації електронного нелінійного осцилятора як джерела псевдовипадкових послідовностей для криптографічних застосувань. В якості математичного апарату обрано модель осцилятора Чуа, що дозволяє досліджувати динаміку нелінійних систем третього порядку та вивчати умови виникнення детермінованого хаосу. Модифікована система рівнянь включає додатковий коефіцієнт керування, що розширює область існування хаотичних атракторів та забезпечує гнучке управління режимами коливальності. Чисельне моделювання динаміки системи виконано методом Рунге–Кутти четвертого порядку, що забезпечує високу точність відтворення траєкторій і стабільність хаотичного режиму за умови експоненціальної чутливості системи до початкових умов. Для програмної реалізації застосовано об'єктно-орієнтований підхід, що дозволив структурувати комплекс як сукупність взаємодіючих об'єктів, включаючи генератор хаосу та модуль криптографічної обробки даних. Використання UML-діаграм класів і послідовностей забезпечує модульність, масштабованість і зрозумілу взаємодію компонентів системи. Особлива увага приділена методам формування хаотичної гами та її застосуванню для криптографічного маскуванню інформаційного сигналу, що гарантує непередбачуваність вихідних послідовностей. Проаналізовано динамічні режими системи, побудовано матрицю «параметр–режим» та визначено вплив початкових умов і параметрів на стабільність хаотичного режиму, що важливо для забезпечення надійності криптографічного захисту. Таким чином, дослідження поєднує математичне моделювання, чисельні методи та об'єктно-орієнтовану архітектуру програмного комплексу для створення надійного джерела високоефективних псевдовипадкових послідовностей, придатних для сучасних криптографічних застосувань та захисту інформаційних потоків.

Ключові слова: захист інформації; імітаційне моделювання; нелінійний осцилятор; детермінований хаос; псевдовипадкові послідовності; метод Рунге–Кутти; UML-проекування; криптографічна стійкість.

Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій безпека передачі та зберігання даних є одним із ключових пріоритетів. Ефективність більшості криптографічних протоколів безпосередньо залежить від якості генераторів псевдовипадкових чисел (ГПЧ), що застосовуються для формування ключів шифрування, ініціалізуючих векторів і автентифікаційних параметрів.

Традиційні алгоритмічні ГПЧ, засновані на лінійних конгруентних методах або регістрах зсуву, характеризуються обмеженою періодичністю та потенційною передбачуваністю. За наявності достатнього обсягу вихідних даних можливе відновлення внутрішнього стану генератора, що створює критичні вразливості для систем захисту інформації в умовах зростання обчислювальних потужностей.

Використання фізичних джерел ентропії здатне підвищити криптографічну стійкість, однак їх інтеграція у цифрові системи пов'язана з технічною складністю та підвищеною вартістю. У зв'язку з цим актуальним науково-технічним завданням є розробка імітаційних моделей нелінійних динамічних систем, що демонструють режим детермінованого хаосу. Такі системи поєднують алгоритмічну відтворюваність за

фіксованих початкових умов із властивостями природного хаосу – неперіодичністю, високою ентропією та експоненціальною чутливістю до початкових параметрів.

Процес перенесення неперервної хаотичної динаміки у дискретне програмне середовище потребує комплексного розв'язання низки науково-практичних задач. Насамперед це стосується забезпечення математичної точності шляхом обґрунтованого вибору чисельних методів, здатних мінімізувати похибки округлення та зберегти інваріантні властивості атратора на великих інтервалах інтегрування. Водночас особлива увага приділяється формуванню програмної архітектури на засадах масштабованих об'єктно-орієнтованих моделей, що дозволяє адаптувати систему до використання в середовищах із різними обчислювальними ресурсами. Ключовим аспектом при цьому виступає статистична надійність, яка гарантує повну відповідність генерованих бітових послідовностей суворим сучасним критеріям випадковості, що висуваються до криптографічних застосувань.

Отже, розробка та дослідження імітаційної моделі електронного нелінійного осцилятора як програмного компонента систем захисту інформації є актуальним напрямом підвищення криптографічної стійкості в сучасних інформаційно-комунікаційних системах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній науковій літературі останніх років спостерігається чітка тенденція інтеграції нелінійних динамічних систем у криптографічні застосування [1, 2]. Багатовимірні хаотичні системи з прихованими атрactorами та їх апаратна реалізація дозволяють значно підвищити надійність криптосистем [3, 4]. Фундаментальні аспекти генерації псевдовипадкових чисел, включно з критеріями якості та порівняльними оглядами методів, детально висвітлено в оглядових роботах [5, 6].

Деякі дослідження пропонують застосування гамільтонових консервативних систем [7] або вдосконалених логістичних мап [8]. Особливу увагу привертають підходи, що поєднують хаотичні карти з квантовими випадковими ходами [9, 10], а також фізичні квантові генератори (QRNG) [11].

Практична ефективність просторових і гіперхаотичних моделей підтверджується їх застосуванням у шифруванні зображень через глобальні бітові перестановки [12, 13] та гібридне керування цифровими картами [14, 15]. Часто такі генератори реалізуються на мікроконтролерах та вбудованих системах [16]. Новітні підходи також включають алгоритм Гартлі [17] і методи машинного навчання, наприклад, нейромережі WGAN-GP, для синтезу статистично стійких послідовностей [18].

Попри значну кількість робіт, питання універсального програмно-орієнтованого моделювання генераторів псевдовипадкових чисел залишається відкритим. Більшість досліджень зосереджені на цифрових імплементаціях та математичному аналізі їхньої динаміки [19], тоді як об'єктно-орієнтоване моделювання і точність переходу від неперервної до дискретної моделі потребують додаткового вивчення [20].

Мета статті

Метою цієї статті є розробка та дослідження об'єктно-орієнтованої імітаційної моделі електронного нелінійного осцилятора, який може використовуватися як програмний компонент для генерації криптографічно стійких псевдовипадкових послідовностей. Для досягнення цієї мети необхідно сформулювати математичний опис динамічної системи, здатної функціонувати в режимі детермінованого хаосу, а також обґрунтувати вибір чисельних методів інтегрування, що забезпечують збереження ключових властивостей атрactorа при переході до дискретного середовища. Додатково передбачено побудову програмної архітектури генератора на принципах об'єктно-орієнтованого підходу з урахуванням вимог масштабованості та можливості інтеграції в сучасні інформаційно-комунікаційні системи.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є програмний прототип генератора псевдовипадкових чисел на основі електронного нелінійного осцилятора. Він використовує математичну модель тривимірної хаотичної системи з прихованим атрactorом, чисельне інтегрування методом Рунге-Кутти четвертого порядку для побудови фазових траєкторій та алгоритм побітової екстракції ентропії з молодших розрядів координат.

Для аналізу поведінки системи застосовано методи теорії детермінованого хаосу, зокрема вивчення точок біфуркації та обчислення показників Ляпунова. Принципи об'єктно-орієнтованого проектування (UML) використано для побудови архітектури моделі, а статистична оцінка за стандартом NIST SP 800-22 дозволяє перевірити криптографічну стійкість згенерованих послідовностей.

На основі аналізу сучасних підходів [1, 8] побудовано модель перетворення неперервної динаміки осцилятора у дискретний потік даних. Визначено критерії вибору кроку інтегрування для мінімізації деградації хаосу та реалізовано демонстраційний приклад програмного комплексу, який забезпечує лавинний ефект при зміні початкових умов і параметрів системи.

Виклад основного матеріалу

Складність структурної організації хаотичних сигналів, їхня виражена нерегулярність, а також експоненціальна чутливість до мінімальних відхилень початкових умов відкривають широкі перспективи для використання детермінованого хаосу в сучасній криптографії. Саме ці властивості дозволяють одному й тому ж алгоритму генерувати некорельовані процеси, що є фундаментом для створення криптографічно стійких систем захисту інформації.

У даному дослідженні як базовий математичний апарат обрано модель осцилятора Чуа. Вибір зумовлений тим, що при відносній простоті опису (система складається лише з трьох диференціальних рівнянь), вона демонструє надзвичайно складну нелінійну динаміку, притаманну стохастичним процесам. Це робить її найбільш ефективною з точки зору програмної та апаратної реалізації в системах шифрування.

Математичний опис динаміки системи у безрозмірній формі, яка є найбільш зручною для імітаційного моделювання, представляється системою автономних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_{C_1}}{dt} = G(v_{C_2} - v_{C_1}) - g(v_{C_1}) \\ C_2 \frac{dv_{C_2}}{dt} = G(v_{C_1} - v_{C_2}) - i_L \\ L \frac{di_L}{dt} = -v_{C_2} \end{cases} \quad (1)$$

де $f(x)$ – кусково-лінійна функція, що описує нелінійну характеристику системи та визначається наступним математичним виразом:

$$g(v_{c1}) = G_b v_{c1} + \frac{1}{2}(G_a - G_b)(|v_{c1} + E| - |v_{c1} - E|) \quad (2)$$

Графічне представлення нелінійної функції (2) наведено на рис. 1, де параметри G_a та G_b визначають крутизну внутрішньої та зовнішньої ділянок відповідно; при цьому точки перегину (зламу) на графіку позначені як E .

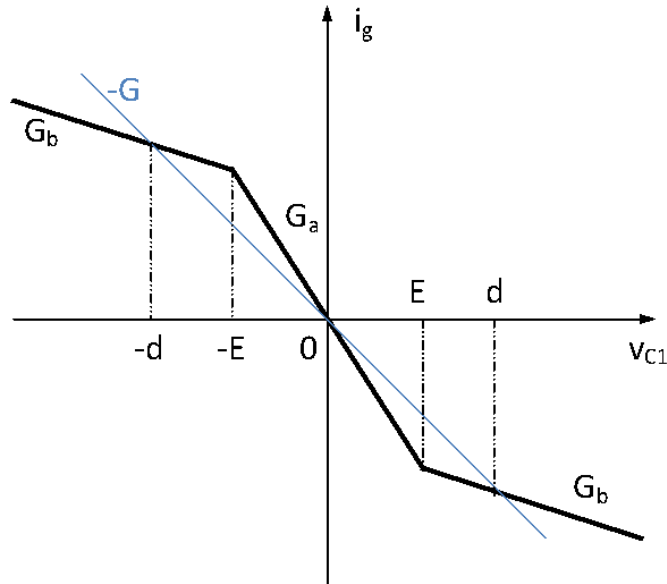


Рис. 1 – Графік вольт-амперної характеристики діода Чуа

На графіку також відображено навантажувальну пряму, в точках перетину якої з вольт-амперною характеристикою формуються три стани рівноваги: d , 0 та $-d$.

Шляхом переходу до безрозмірних коефіцієнтів у системі диференціальних рівнянь (1), математична модель набуває вигляду, найбільш зручного для програмної реалізації та імітаційного моделювання:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(y - x - h(x)) \\ \frac{dy}{dt} = x - y + z \\ \frac{dz}{dt} = -\beta y \end{cases} \quad (3)$$

де функція $f(x)$ визначена як:

$$h(x) = m_1 x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x + 1| - |x - 1|) \quad (4)$$

У межах даної роботи було застосовано модифіковану математичну модель, в яку введено додатковий коефіцієнт c . Це дозволяє забезпечити гнучкіше керування режимами коливань системи та розширити область існування хаотичних атракторів. Модифікована система рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(y - x - h(x)) \\ \frac{dy}{dt} = c(x - y + z) \\ \frac{dz}{dt} = -\beta y \end{cases} \quad (5)$$

Математична структура функції $h(x)$ у модифікованій системі рівнянь (5) залишається ідентичною її аналітичному визначенню, наведеному у формулі (4). Це забезпечує збереження ключових властивостей нелінійності, необхідних для генерації хаотичних процесів, навіть при введенні додаткового коефіцієнта керування c . Результати чисельного моделювання отриманої системи рівнянь підтверджують, що за умови дотримання специфічних співвідношень між параметрами моделі, динаміка змінних набуває вираженого хаотичного характеру. Слід зауважити, що стійкі режими хаотичних коливань локалізовані у відносно вузьких діапазонах значень параметрів, що висуває високі вимоги до точності обчислювальних алгоритмів та вибору початкових умов.

Аналіз динамічних режимів системи показав, що за певних значень параметрів в околі точок рівноваги d або $-d$ виникає стійкий граничний цикл. У разі подальшої зміни керуючих коефіцієнтів у системі спостерігається каскад подвоєння періоду, що є класичним шляхом переходу до детермінованого хаосу, зокрема до формування атрактора типу Ресслера.

При досягненні критичних значень параметрів, що відповідають режиму розвиненого хаосу, відбувається об'єднання локальних траєкторій у складну структуру – дивний атрактор «подвійний завихрєнь» (Double Scroll). Саме цей режим, завдяки своїй топологічній складності та високій ентропії, був обраний для генерації псевдовипадкових послідовностей у розробленій системі шифрування.

Динаміка такого атрактора характеризується вираженою неперіодичністю та нестійкістю траєкторій, що зумовлює експоненціальну чутливість системи до мінімальних флуктуацій параметрів. Ключовими ознаками такого режиму, що підтверджують його хаотичну природу, є неперервний (суцільний) частотний спектр та стрімке згасання автокореляційної функції в часі.

З точки зору криптографічного захисту, ці властивості забезпечують фундаментальну непередбачуваність генерованих послідовностей. Будь-яка похибка у визначенні початкових умов або параметрів системи через короткий проміжок часу призводить до значної розбіжності між прогнозованою та реальною траєкторіями. Це робить практично неможливим відновлення секретного ключа методами лінійного або диференціального аналізу, оскільки детермінована природа системи нівелюється її топологічною складністю.

Одним із ключових параметрів, що генеруються математичною моделлю у безрозмірній формі, є часова залежність координати x . Хаотичний характер змін даної змінної дозволяє використовувати її як основу для формування криптографічної гами. У сучасній криптосистемах на основі динамічного хаосу виділяють три базові методи шифрування:

- Хаотичне маскування – пряме підсумовування інформаційного сигналу з хаотичною послідовністю.
- Перемикання режимів (Chaos Shift Keying) – кодування логічних станів («0» та «1») різними типами хаотичних сигналів або параметрами різних координат (наприклад, x та y).
- Нелінійне підмішування – інтеграція інформаційного повідомлення безпосередньо у структуру диференціальних рівнянь, що змінює динаміку самого атрактора.

У межах даного дослідження реалізовано алгоритм хаотичного маскування. Для досягнення статистичних характеристик, максимально наближених до істинно випадкових послідовностей, замість прямого використання амплітудних значень застосовано метод динамічного зрізу.

Цей підхід полягає у вибіркового отриманні значень фазової координати x через нерегулярні проміжки часу або шляхом екстракції лише певних розрядів цифрового представлення числа. Така обробка дозволяє нівелювати детерміновану природу генератора та суттєво підвищити складність криптоаналізу для потенційного злоумисника.

Під час проектування програмного комплексу було застосовано методи об'єктно-орієнтованого

аналізу та дизайну, що дозволило структурувати систему як сукупність взаємодіючих об'єктів. Цей підхід забезпечує розгляд предметної області через логічні сутності, де основна увага при аналізі приділяється визначенню об'єктів у термінах криптографічного захисту та нелінійної динаміки. У процесі проектування визначено логічні програмні об'єкти, які реалізовані засобами об'єктно-орієнтованої мови програмування та включають відповідні атрибути (параметри моделі Чуа) і методи (алгоритми чисельного інтегрування та перетворення даних). Етап конструювання забезпечив безпосередню реалізацію розроблених класів та компонентів, що гарантує розширюваність та модульність системи. Основні функціональні можливості розробленого програмного забезпечення та сценарії взаємодії користувача з системою відображені на діаграмі варіантів використання, яка наведена на рисунку 2.

Варіант використання визначає функціональну можливість системи, що дозволяє користувачу отримати конкретний вимірюваний результат шляхом типової взаємодії з програмним комплексом [20]. У контексті даної роботи ключовим сценарієм є функція «Розшифрувати текст», метою якої є відновлення вихідного повідомлення за допомогою хаотичної гами.

Діючою особою (актором) виступає користувач додатка. Для коректного виконання операції необхідне дотримання попередніх умов: наявність встановленого ключа з'єднання та валідного сеансового ключа. Процес активується за командою користувача на перевірку вхідного буфера зашифрованих даних.

Основний потік подій включає наступні кроки:

1. Налаштування криптосистемою параметрів і внутрішнього стану генератора хаосу.
2. Отримання вхідного масиву зашифрованих даних.
3. Дешифрування інформаційного потоку шляхом синхронної генерації хаотичної траєкторії.
4. Верифікація цілісності даних через перевірку контрольної суми.
5. Виведення відновленого тексту на інтерфейс користувача.

Альтернативні сценарії обробки помилок:

- Відсутність ключа з'єднання: повернення коду помилки про некоректні параметри ініціалізації.
- Помилка сеансового ключа: формування сповіщення про неможливість синхронізації генераторів.
- Збій при отриманні даних: реєстрація помилки мережевого обміну або доступу до пам'яті.
- Порушення цілісності (Checksum error): повернення коду помилки про пошкодження блоку тексту, що вказує на розсинхронізацію або втручання в канал зв'язку.

Таким чином, детальний розгляд сценарію «Розшифрувати текст» дозволяє формалізувати логіку роботи модуля-приймача в умовах програмної реалізації хаотичної криптосистеми.

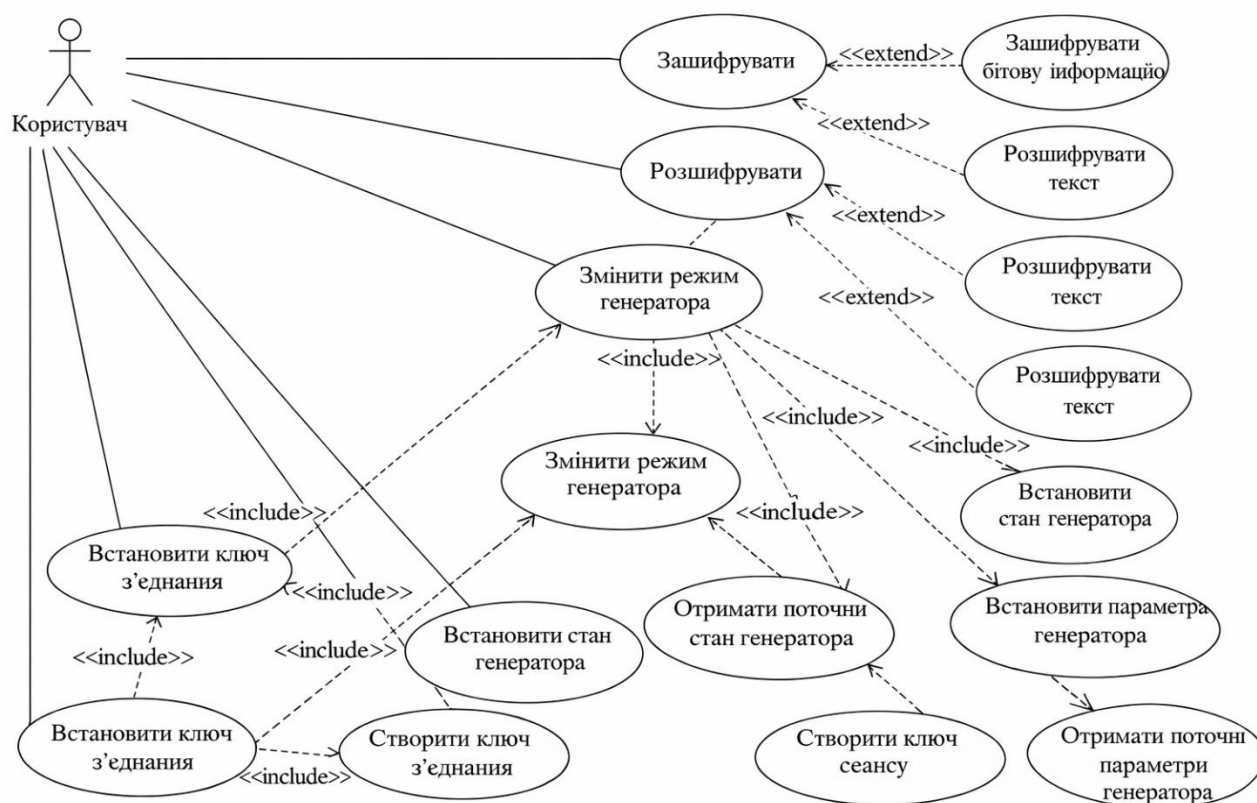


Рис. 2 – Діаграма варіантів використання

Об'єктно-орієнтована архітектура програмного комплексу базується на декомпозиції системи на окремі класи, кожен з яких відповідає за конкретний аспект функціонування моделі. Діаграма класів призначена для візуалізації структури цих класів, визначення їхніх атрибутів, методів, а також типів взаємозв'язків та ієрархії взаємодії між ними.

Проектне рішення передбачає поділ обчислювальної логіки (чисельне розв'язання системи диференціальних рівнянь Чуа) та криптографічної обробки даних (генерування гами та маскування інформаційного сигналу). Класи, що забезпечують стабільне функціонування генератора хаосу та інтегрованої криптосистеми, а також логіку їхньої взаємодії, представлені на діаграмі класів на рисунку 3.

Аналіз структури класів дозволяє простежити архітектурні зв'язки між компонентами, що забезпечують функціонування криптосистеми, а також визначити специфікацію структур для зберігання параметрів хаотичного процесу.

Для забезпечення гнучкості обробки даних реалізовано механізм перевантаження методів: функція *Encrypt* адаптована для роботи як з текстовими, так і з бінарними (бітовими) типами даних. Це зумовлено необхідністю застосування різних алгоритмічних

підходів до кодування інформації залежно від її формату при збереженні єдиного інтерфейсу керування.

Клас *Encryptor* реалізований із дотриманням принципу інкапсуляції. Він містить об'єкт *EncrGen* класу *Generator* у закритій секції. Поля цього об'єкта, як і сам екземпляр генератора, захищені від прямого зовнішнього доступу. Будь-яка взаємодія з параметрами хаотичної системи можлива лише через відкриті (*public*) методи класу *Encryptor*. Таке архітектурне рішення виключає некоректну зміну внутрішніх робочих даних об'єкта *EncrGen* та гарантує стабільність формування хаотичної гами під час сеансу зв'язку.

Діаграма послідовності призначена для відображення набору об'єктів на єдиній часовій осі їхнього життєвого циклу (створення – діяльність – знищення) та логіки їхньої взаємодії (надсилання запитів та отримання відповідей). Вона дозволяє детально проаналізувати динаміку роботи системи та хронологію обміну повідомленнями між її компонентами.

Процес взаємодії об'єктів для розглянутого варіанта використання «Розшифрувати текст», що демонструє етапи ініціалізації генератора, запиту хаотичної гами та верифікації даних, представлений на рис. 4.

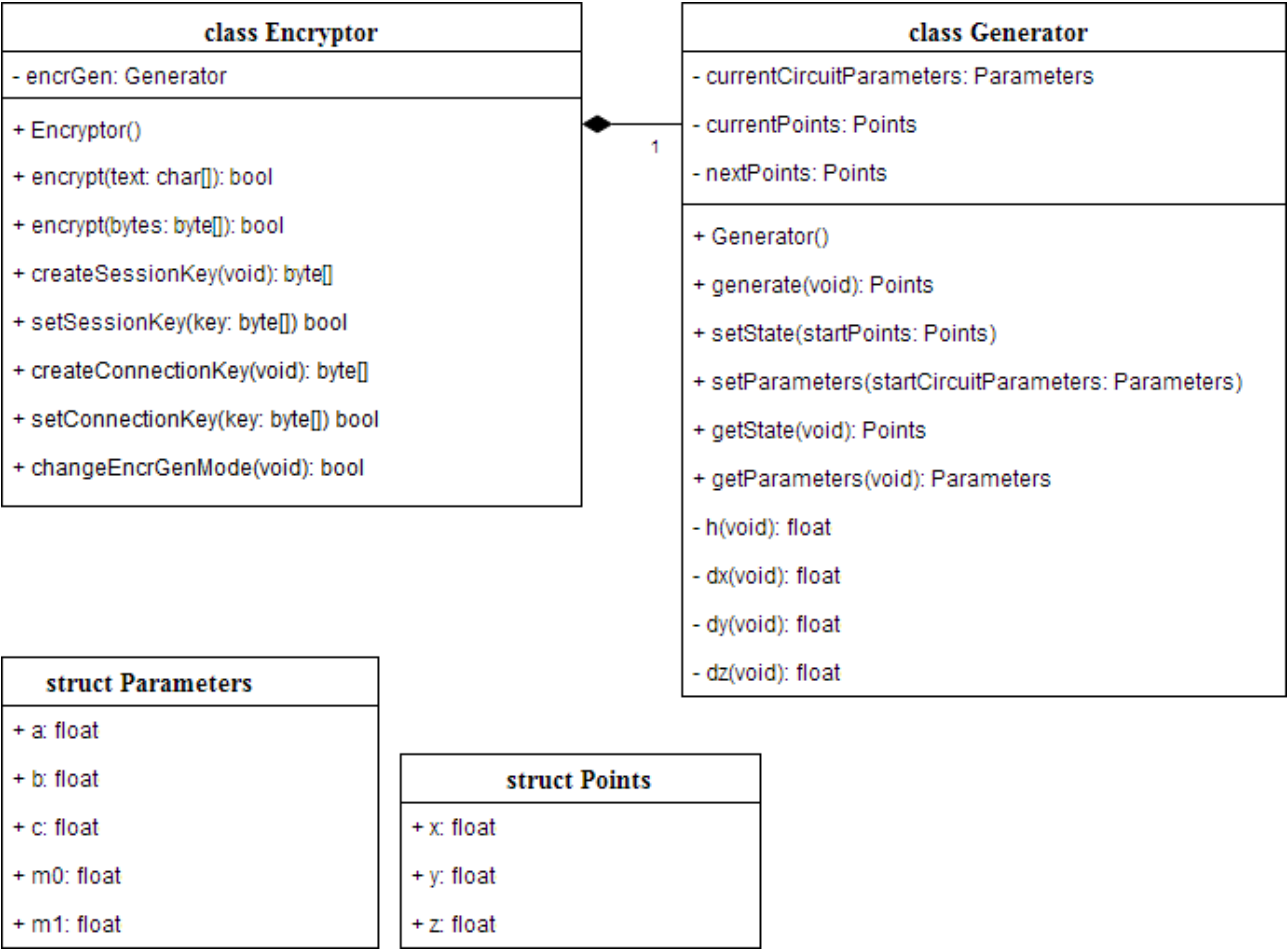


Рис. 3 – Діаграма класів

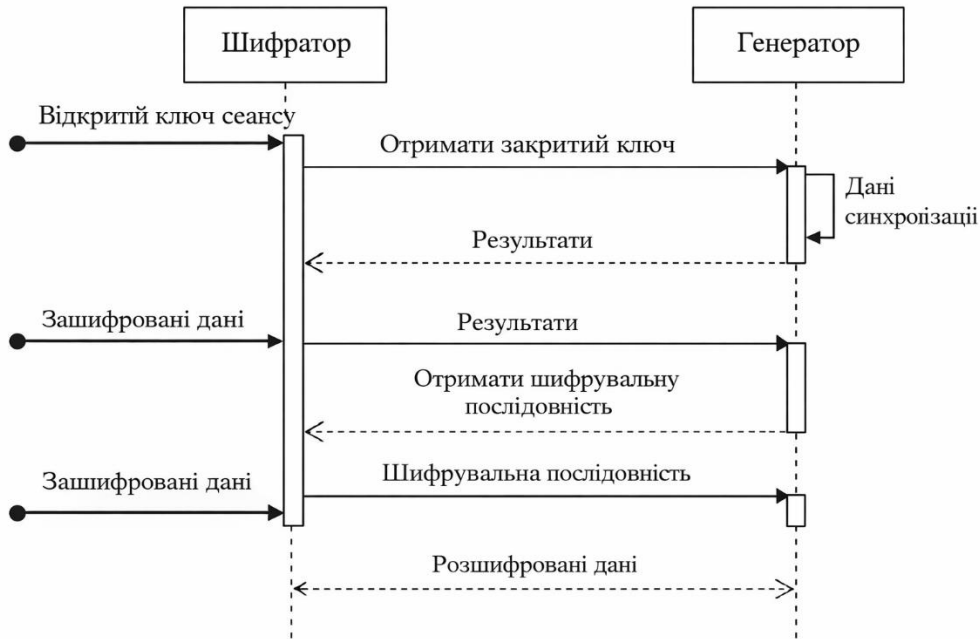


Рис. 4 – Процес взаємодії об’єктів для розглянутого варіанта використання «Розшифрувати текст»

Для чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку генератора хаосу, у класі *Generator* використано метод Рунге-Кутти четвертого порядку. Вибір даного методу зумовлений необхідністю забезпечення високої точності обчислень, оскільки хаотичні системи мають експоненціальну чутливість до накопичення похибок.

Алгоритм передбачає ітераційне обчислення значень фазових координат x , y , z з фіксованим кроком інтегрування. На кожній ітерації програма розраховує чотири проміжні коефіцієнти, що дозволяє мінімізувати локальну похибку та забезпечити стабільність хаотичного атрактора.

Програмна реалізація методу дозволяє отримувати детерміновану послідовність значень, яка є ідентичною як на стороні передавача, так і на стороні приймача за умови збігу початкових значень (ключів).

Це завершує архітектурну побудову системи: від математичної моделі та об'єктно-орієнтованої структури класів до конкретного обчислювального алгоритму. Отримана таким чином хаотична послідовність після обробки методом зрізу передається в метод *Encrypt* класу *Encryptor* для виконання операцій криптографічного маскування.

Висновки

У статті розроблено та досліджено об'єктно-орієнтовану імітаційну модель нелінійного осцилятора Чуа для генерації псевдовипадкових послідовностей. На основі проведеного дослідження сформульовано такі висновки:

1. Обґрунтовано вибір системи Чуа як базового генератора завдяки її топологічній складності та здатності формувати атрактор типу «Double Scroll» при мінімальній кількості параметрів. Введення додаткового керуючого коефіцієнта з розширює область існування хаотичних режимів і забезпечує гнучке управління генератором.
2. Забезпечено високу точність моделювання хаотичної динаміки в дискретному середовищі за допомогою методу Рунге-Кутти 4-го порядку, що гарантує детерміновану повторюваність траєкторій на стороні передавача та приймача – критично для синхронної криптографічної обробки.
3. Реалізовано гнучку об'єктно-орієнтовану архітектуру (UML), у якій логіка генератора та модуль *Encryptor* чітко розділені. Інкапсуляція параметрів генератора та механізм перевантаження методів *Encrypt* забезпечують захист внутрішніх даних та масштабованість системи для різних типів інформації.
4. Проаналізовано вплив параметрів системи та початкових умов на стабільність хаотичного режиму. Дослідження підтвердило, що навіть мінімальні зміни початкових значень значно змінюють траєкторію атрактора, що забезпечує непередбачуваність генерованого потоку.

5. Розроблена модель може бути інтегрована в сучасні інформаційно-комунікаційні системи як програмний компонент для захищеної передачі даних у цифровому середовищі.

Перелік використаних джерел

- [1] A New 3D Chaotic System with Hidden Attractor: Dynamics, Circuit Implementation and Its Application in Cryptography / A. Sambas et al. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 64610–64627. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3181424>.
- [2] Hyperchaotic System for Secure Communication: A Modified 4D Model and its Dynamics / Aldwoah K., Hassan E. I., Alsharafi M. & Alharbi A. F. *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*. 2025. Vol. 32. Article 90. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44198-025-00348-8>.
- [3] Enhanced chaotic pseudorandom number generation using multiple Bernoulli maps with Field Programmable Gate Array optimizations / L. Palacios-Luengas et al. *Information*. 2024. Vol. 15. No. 11. Article 667. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15110667>.
- [4] Bhattacharjee K., Das S. A Search for Good Pseudorandom Number Generators: Survey and Empirical Studies. *Computer Science Review*. 2022. Vol. 45. Article 100471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2022.100471>.
- [5] El-den B. M., Raslan W. A., Abdullah A. A. Even Symmetric Chaotic and Skewed Maps as a Technique in Video Encryption. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2023. Vol. 2023, Article 40. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01003-4>.
- [6] Zhang J., Lu Z., Li M. Research on an effective image encryption scheme based on hyper-chaos using global bit permutation. *Technology and Health Care*. 2020. Vol. 28, No. S1. Pp. 313–323. DOI: <https://doi.org/10.3233/THC-209030>.
- [7] Patidar V., Singh T. A Novel Approach to Pseudorandom Number Generation Using Hamiltonian Conservative Chaotic Systems. *Frontiers in Physics*. 2025. Vol. 13. Article 1553389. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2025.1553389>.
- [8] Alawida M. Enhancing logistic chaotic map for improved cryptographic security in random number generation. *Journal of Information Security and Applications*. 2024. Vol. 80. Article 103685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2023.103685>.
- [9] A Pseudorandom Number Generator Based on the Chaotic Map and Quantum Random Walks / Zhao W., Chang Z., Ma C., Shen Z. *Entropy*. 2023. Vol. 25, no. 1. Article 166. DOI: <https://doi.org/10.3390/e25010166>.
- [10] Sun F., Lv Z., Wang C. Pseudo-Random Number Generation Based on Spatial Chaotic Map of Logistic Type and Its Cryptographic Application. *International Journal of Modern Physics C*. 2025. Vol. 36, no. 1.

- Article 2450172. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0129183124501729>.
- [11] Özpolat E., Çelik V., Gülten A. Hyperchaotic System-Based PRNG and S-Box Design for a Novel Secure Image Encryption. *Entropy*. 2025. Vol. 27, no. 3. Article 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/e27030299>.
- [12] Shi Y., Deng Y. Hybrid Control of a Digital Baker Map with Application to a Pseudo-Random Number Generator. *Entropy*. 2021. Vol. 23, no. 5. Article 578. DOI: <https://doi.org/10.3390/e23050578>.
- [13] Hardware Pseudorandom Number Generator Using Stochastic Computing and Logistic Map / J. Liu et al. *Micromachines*. 2021. Vol. 12, no. 1. Article 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12010031>.
- [14] Pseudorandom Number Generator Based on Novel 2D Hénon–Sine Hyperchaotic Map With Microcontroller Implementation / D. Murillo-Escobar et al. *Nonlinear Dynamics*. 2023. Vol. 111. Pp. 6773–6789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-08101-2>.
- [15] Quantum walks with cascaded discrete times with induced chaotic dynamics and cryptographic applications / Abd El-Latif A. A., Abd-El-Atti B., Amin M., Ilyasu A. M. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article 1930. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58636-w>.
- [16] High-security multidimensional data protection system based on a Hartley algorithm-based chaotic scheme / J. Cui et al. *Optics Express*. 2024. Vol. 32, no. 13. Pp. 22295–22312. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.522606>.
- [17] Quantum random number generators / Jacak M. M., Jóźwiak P., Niemczuk J., Jacak J. E. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 16104. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95388-7>.
- [18] Lian S., Sun J., Wang Z. Implementation and practical problems of chaos-based cryptography. *Journal of Information Security and Applications*. 2020. Vol. 50. Article 102421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2019.102421>.
- [19] Learned pseudo-random number generator: WGAN-GP for generating statistically sound random numbers / Okada K., Endo K., Yasuoka K., Kurabayashi S. *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, no. 6. Article e0287025. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287025>.
- [20] Design of New Chaotic System With Hyperbolic Sine Function Based on Pseudo-Random Number Generation for Medical Image Encryption / R. Ramar et al. *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*. 2025. Vol. 32. Article 52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44198-025-00308-2>.

SIMULATION MODEL OF AN ELECTRONIC NONLINEAR OSCILLATOR FOR HIGH-ENTROPY SEQUENCE GENERATION IN INFORMATION SECURITY PROBLEMS

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;

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

Modern information security systems and protected communication channels require sources of high entropy and resistance to predictability. This paper proposes an approach for modeling and software implementation of an electronic nonlinear oscillator as a source of pseudorandom sequences for cryptographic applications. The mathematical framework is based on the Chua oscillator model, which allows investigating the dynamics of third-order nonlinear systems and studying the conditions for the onset of deterministic chaos. The modified system of equations includes an additional control coefficient, which extends the range of chaotic attractors and provides flexible management of oscillation regimes. Numerical simulation of the system dynamics was performed using the fourth-order Runge–Kutta method, ensuring high-precision reproduction of trajectories and stability of the chaotic regime under exponential sensitivity to initial conditions. For software implementation, an object-oriented approach was applied, structuring the system as a set of interacting objects, including the chaos generator and the cryptographic data processing module. The use of UML class and sequence diagrams ensures modularity, scalability, and clear component interaction. Special attention is given to methods for generating chaotic keystreams and their use for cryptographic signal masking, guaranteeing the unpredictability of output sequences. The system's dynamic regimes were analyzed, a «parameter–regime» matrix was constructed, and the influence of initial conditions and system parameters on the stability of the chaotic regime was determined, which is critical for reliable cryptographic protection. Thus, the study integrates mathematical modeling, numerical methods, and object-oriented software architecture to create a robust source of high-quality pseudorandom sequences suitable for modern cryptographic applications and secure information transmission.

Keywords: information security; simulation modeling; nonlinear oscillator; deterministic chaos; pseudorandom sequences; Runge–Kutta method; UML design; cryptographic robustness.

References

- [1] A. Sambas, S. Vaidyanathan, and X. Zhang, "A New 3D Chaotic System with Hidden Attractor: Dynamics, Circuit Implementation and Its Application in Cryptography," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64610–64627, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181424.
- [2] K. Aldwoah, E. I. Hassan, M. Alsharafi, and A. F. Alharbi, "Hyperchaotic System for Secure Communication: A Modified 4D Model and its Dynamics," *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, vol. 32, article 90, 2025. doi: 10.1007/s44198-025-00348-8.
- [3] L. Palacios-Luengas, R. C. Medina-Ramírez, R. Marcelín-Jiménez, E. Rodríguez-Colina, F. R. Castillo-Soria, and R. Vázquez-Medina, "Enhanced chaotic pseudorandom number generation using multiple Bernoulli maps with Field Programmable Gate Array optimizations," *Information*, 2024. vol. 15, no. 11, article 667, 2024. doi: 10.3390/info15110667.
- [4] K. Bhattacharjee, and S. Das, "A Search for Good Pseudo-Random Number Generators: Survey and Empirical Studies," *Computer Science Review*, vol. 45, article 100471, 2022. doi: 10.1016/j.cosrev.2022.100471.
- [5] B. M. El-den, W. A. Raslan, and A. A. Abdullah, "Even Symmetric Chaotic and Skewed Maps as a Technique in Video Encryption," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2023, article 40, 2023. doi: 10.1186/s13634-023-01003-4.
- [6] J. Zhang, Z. Lu, and M. Li, "Research on an effective image encryption scheme based on hyper-chaos using global bit permutation," *Technology and Health Care*, vol. 28, no. s1, pp. 313–323, 2020. doi: 10.3233/THC-209030.
- [7] V. Patidar, and T. Singh, "A Novel Approach to Pseudorandom Number Generation Using Hamiltonian Conservative Chaotic Systems," *Frontiers in Physics*, vol. 13, article 1553389, 2025. doi: 10.3389/fphy.2025.1553389.
- [8] M. Alawida, "Enhancing logistic chaotic map for improved cryptographic security in random number generation," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 80, article 103685, 2024. doi: 10.1016/j.jisa.2023.103685.
- [9] W. Zhao, Z. Chang, C. Ma, and Z. Shen, "A Pseudorandom Number Generator Based on the Chaotic Map and Quantum Random Walks," *Entropy*, vol. 25, no. 1, article 166, 2023. doi: 10.3390/e25010166.
- [10] F. Sun, Z. Lv, and C. Wang, "Pseudo-Random Number Generation Based on Spatial Chaotic Map of Logistic Type and Its Cryptographic Application," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 35, no. 2, article 2450024, 2024. doi: 10.1142/S0129183124500246.
- [11] E. Özpolat, V. Çelik, and A. Gülsen, "Hyperchaotic System-Based PRNG and S-Box Design for a Novel Secure Image Encryption," *Entropy*, vol. 27, no. 3, article 299, 2025. doi: 10.3390/e27030299.
- [12] Y. Shi, and Y. Deng, "Hybrid Control of a Digital Baker Map with Application to a Pseudo-Random Number Generator," *Entropy*, vol. 23, no. 5, article 578, 2024. doi: 10.3390/e23050578.
- [13] J. Liu et al., "Hardware Pseudorandom Number Generator Using Stochastic Computing and Logistic Map," *Micromachines*, vol. 12, no. 1, article 31, 2021. doi: 10.3390/mi12010031.
- [14] D. Murillo-Escobar, M. Á. Murillo-Escobar, C. Cruz-Hernández, and L. Cardoza-Avendaño, "Pseudorandom Number Generator Based on Novel 2D Hénon–Sine Hyperchaotic Map With Microcontroller Implementation," *Nonlinear Dynamics*, vol. 111, pp. 6773–6789, 2023. doi: 10.1007/s11071-022-08101-2.
- [15] A. A. Abd El-Latif, B. Abd-El-Atti, M. Amin, and A. M. Ilyasu, "Quantum walks with cascaded discrete times with induced chaotic dynamics and cryptographic applications," *Scientific Reports*, vol. 10, article 1930, 2020. doi: 10.1038/s41598-020-58636-w.
- [16] J. Cui et al., "High-security multidimensional data protection system based on a Hartley algorithm-based chaotic scheme," *Optics Express*, vol. 32, no. 13, pp. 22295–22312, 2024. doi: 10.1364/OE.522606.
- [17] M. M. Jacak, P. Jóźwiak, J. Niemczuk, and J. E. Jacak, "Quantum random number generators," *Scientific Reports*, vol. 11, article 16104, 2021. doi: 10.1038/s41598-021-95388-7.
- [18] S. Lian, J. Sun, and Z. Wang, "Implementation and practical problems of chaos-based cryptography," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 50, article 102421, 2020. doi: 10.1016/j.jisa.2019.102421.
- [19] K. Okada, K. Endo, K. Yasuoka, and S. Kurabayashi, "Learned pseudo-random number generator: WGAN-GP for generating statistically sound random numbers," *PLOS ONE*, vol. 18, no. 6, article e0287025, 2023. doi: 10.1371/journal.pone.0287025.
- [20] R. Ramar et al., "Design of New Chaotic System With Hyperbolic Sine Function Based on Pseudo-Random Number Generation for Medical Image Encryption," *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, vol. 32, article 52, 2025. doi: 10.1007/s44198-025-00308-2.

Стаття надійшла 24.01.2026

Стаття прийнята 26.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Левицька Т. О., Носовська С.С. Імітаційна модель електронного нелінійного осцилятора для генерації високоентропійних послідовностей у задачах захисту інформації. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359779>.

РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ ДО НА
ОСНОВІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ЗГОРТКОВИХ
НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Чичкарьов Є.А. д-р техн. наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4362-5129>, e-mail: e.chyckharov@duikt.edu.ua;

Семенов О.В. аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9749-3343>, e-mail: sasha.sem.fti@gmail.com

У роботі розглядається актуальна наукова проблема розпізнавання зображень в умовах обмежень сучасних нейромережових архітектур. Обґрунтовано доцільність застосування гібридного підходу, що поєднує структурну точність згорткових нейронних мереж (CNN) із семантичною гнучкістю мультимодальних великих мовних моделей (MLLM). Метою дослідження є розробка та апробація методу, що дозволяє усунути обмеженість категорій класичних систем розпізнавання та схильність мультимодальних моделей до формування неіснуючих об'єктів. У ході дослідження застосовано методи ієрархічної класифікації, узгодженого голосування (Hybrid Voting) та формування текстових інструкцій (Prompt Engineering). Для програмної реалізації використано моделі MobileNetV2 та локальні MLLM (серії Gemma 3, LLaVA) у хмарному середовищі Google Colab із застосуванням інструменту Ollama. Валідація підходу здійснювалася на датасетах MNIST, CIFAR-10 та Flowers102. Ключовим результатом роботи є встановлення того, що гібридна архітектура забезпечує вищу достовірність розпізнавання порівняно з автономним використанням моделей. Зокрема, на складному датасеті Flowers102 зафіксовано приріст точності до 92,3%. Визначено, що використання CNN як базового шару дозволяє нівелювати слабкість мовних моделей у роботі з низькорозмірними даними, тоді як MLLM забезпечує глибоку семантичну інтерпретацію в умовах візуальної схожості об'єктів. Наукова новизна полягає у розробці динамічного механізму взаємодії нейромережових архітектур, що дозволяє оптимізувати обчислювальні ресурси та підвищити надійність систем розпізнавання в умовах невизначеності. Практичне значення роботи підтверджується можливістю впровадження запропонованого конвеєра в системи пакетної обробки даних та інтерактивні застосунки.

Ключові слова: розпізнавання зображень; згорткові нейронні мережі; мультимодальні великі мовні моделі; гібридний підхід; MobileNetV2; Gemma 3; розпізнавання без попереднього навчання; Google Colab; Ollama.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку штучного інтелекту характеризується стрімкою парадигмальною зміною: переходом від вузькоспеціалізованих моделей до універсальних мультимодальних систем. Попри значні успіхи згорткових нейронних мереж (CNN) у задачах класифікації, вони залишаються функціонально обмеженими системами, здатними оперувати лише тими категоріями об'єктів, що були визначені на етапі навчання. Водночас поява мультимодальних великих мовних моделей (MLLM), таких як Gemini, GPT-4V та LLaVA, відкрила нові можливості для розпізнавання без попереднього навчання (Zero-shot). Проте їх впровадження виявило низку специфічних викликів, зокрема схильність до «галюцинацій» та високу обчислювальну складність [1–4].

Порівняльний аналіз можливостей CNN та MLLM вказує на фундаментальну наукову проблему: механізми опрацювання візуальної інформації в цих архітектурах суттєво розрізняються. Моделі типу MobileNetV2 або ResNet [5–6] орієнтовані на прецизійне виділення локальних ознак – текстур, контурів та геометричних патернів. Хоча такі архітектури демонструють високу ефективність у задачах із фіксованою множиною класів, відсутність широкого когнітивного контексту обмежує їхню здатність до семантичної

інтерпретації об'єктів, які мають суттєві візуальні відмінності від еталонних навчальних зразків.

На противагу цьому, мультимодальні моделі (зокрема серії Gemini та Gemma 3) базуються на принципах контекстуального висновку та широкої семантичної генералізації. Однак їхні архітектурні особливості зумовлюють виникнення явища «зміщення до глобального контексту» (Global context bias). У практичних сценаріях це призводить до домінування лінгвістичних імовірностей над безпосереднім візуальним аналізом деталей. Як наслідок, спостерігається зниження точності в задачах дрібнозернистої класифікації (наприклад, у наборах даних Flowers102 або MNIST), де критично важливим є аналіз морфологічних мікроознак, а не загальна семантика сцени [1–4].

Наявність цих розбіжностей створює передумови для розробки гібридного підходу, метою якого є конвергенція структурної точності згорткових мереж та семантичної гнучкості мультимодальних моделей для підвищення загальної надійності систем розпізнавання.

У реальних системах (IoT, мобільні додатки) використання MLLM для кожного вхідного кадру є економічно та технічно недоцільним через величезні витрати пам'яті та енергії. З іншого боку, використання лише CNN не забезпечує необхідної адаптивності в умовах динамічної зміни наборів даних. Виникає

потреба у створенні динамічного механізму перемикавання (gating mechanism), який би дозволяв системі самостійно вирішувати, коли достатньо швидкого висновку CNN, а коли необхідне залучення інтелектуального арбітражу MLLM.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Протягом останнього десятиліття згорткові нейронні мережі (CNN) домінували в архітектурах комп'ютерного зору завдяки їхній здатності ефективно виділяти просторові ієрархії ознак. Фундаментальні праці, зокрема дослідження [5, 6] щодо залишкових мереж (ResNet), заклали основу для створення глибоких моделей, здатних до навчання на тисячах категорій об'єктів. Проте деякі роботи [7] продемонстрували суттєве обмеження таких архітектур: процес розпізнавання в них суворо обмежений переліком міток, які були представлені на етапі навчання. Це створює проблему при обробці динамічних або нестандартних візуальних даних, де виникає потреба у залученні зовнішніх знань для інтерпретації об'єктів, що виходять за межі фіксованого набору категорій.

Важливим етапом подолання обмежень класичних CNN стала розробка концепції контрастивного навчання зображень та мови (CLIP). Автори [7] довели, що навчання візуальних моделей на основі природної мови дозволяє досягти високої точності в задачах «Zero-shot» класифікації (класифікація без попереднього навчання на конкретних мітках). Модель CLIP навчилася зіставляти візуальні патчі з текстовими описами в спільному латентному просторі, що дозволило інтерпретувати зображення як семантичні сутності, а не просто як набори пікселів. Це відкрило шлях до створення мультимодальних великих мовних моделей (MLLM), які здатні «міркувати» над візуальним контентом.

Подальший розвиток мультимодальних систем пов'язаний із впровадженням методів візуального налаштування інструкцій (Visual Instruction Tuning). У дослідженні [1-2] була представлена модель LLaVA, яка інтегрує візуальний енкодер CLIP із великою мовною моделлю через проекційну матрицю. Це дозволило перетворити завдання розпізнавання зображень на діалоговий процес. Проте аналіз публікацій останніх років виявив нову проблему: такі моделі схильні до надмірного покладання на лінгвістичний контекст, що іноді призводить до ігнорування дрібних візуальних деталей, які класична згорткова мережа розпізнала б безпомилково.

Грунтовний огляд сучасного стану галузі мультимодальних великих мовних моделей наведено в [6]. Автори [8] систематизували архітектурні підходи, методи навчання на інструкціях та стратегії вирівнювання модальностей. Автори [9] підкреслили вразливість мультимодальних систем до явища «галюцинацій». За даними [8, 9] MLLM можуть генерувати впевнені, але фактично невірні описи зображень, особливо

якщо візуальна сцена є зашумленою або об'єкти мають низьку роздільну здатність (наприклад, у наборі даних MNIST). Це створює потребу в гібридизації, де CNN виступає як «стабілізатор», що забезпечує структурну точність і перевіряє семантичні припущення мовної моделі.

Перенесення навчання є ключовим механізмом, що дозволяє використовувати знання, отримані на великих датасетах (ImageNet), для задач із малими вибірками [10, 11]. У гібридному підході CNN виступає в ролі провідника ознак (feature extractor) з замороженими ваговими коефіцієнтами, тоді як LLM забезпечує семантичну інтерпретацію отриманих ознак. Дослідження [10, 11] підтвердили, що поєднання самонавчання та перенесення навчання суттєво підвищує стійкість до розподільного зсуву, що особливо критично для тонкозернистої класифікації.

Сучасні тенденції вказують на ефективність поєднання легких архітектур, таких як MobileNetV2, з потужними хмарними моделями. Наприклад, в роботі [12] наведено модель Flamingo, яка містить наступні ключові архітектурні інновації: (i) поєднання потужних попередньо навчених моделей, що працюють лише з візуалізацією, та моделей, що працюють лише з мовою, (ii) обробки послідовностей довільно чергуваних візуальних та текстових даних, та (iii) безперешкодного завантаження зображень або відео як вхідних даних. На думку авторів [12], модель Flamingo може досягти нового рівня техніки за допомогою навчання за кілька спроб, просто підказуючи моделі приклади, що відповідають конкретним завданням.

Гібридні системи дозволяють використовувати переваги обох підходів: MobileNetV2 забезпечує швидке виділення локальних ознак, а велика мовна модель додає семантичну глибину та здатність до узагальнення. Такий підхід дозволяє оптимізувати обчислювальні ресурси та підвищити загальну надійність систем розпізнавання в умовах невизначеності.

Мета статті

Мета цієї роботи полягає у розробці та апробації гібридного підходу, який забезпечує поєднання структурної точності згорткових нейронних мереж із контекстуальним аналізом мультимодальних великих мовних моделей.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

- Розробка стратегії узгодженого голосування, за якої результати роботи згорткової мережі піддаються перевірці за допомогою спеціально сформованих текстових інструкцій у мовній моделі.
- Аналіз логічних збоїв у процесах розпізнавання обох типів архітектур та побудова матриці помилок для їх подальшого усунення.
- Оптимізація процесів виконання та взаємодії мультимодальних моделей у хмарних середовищах без втрати достовірності результатів класифікації.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процес автоматичної класифікації та семантичної інтерпретації візуальних даних у гетерогенних середовищах.

Предметом дослідження є архітектурні рішення, алгоритми гібридної взаємодії між локальними екстракторами ознак (на основі CNN) та системами контекстуального виводу (на основі MLLM), а також методи оптимізації їхньої спільної роботи в хмарних інфраструктурах.

Для досягнення мети роботи було застосовано комплексний підхід, що базується на наступних методах:

- Метод ієрархічної класифікації: реалізація дворівневої структури прийняття рішень, де перший рівень забезпечує швидку структурну обробку, а другий – поглиблений семантичний аналіз.

- Метод узгодженого голосування (Hybrid Voting): алгоритм порівняння результатів роботи різних архітектур для мінімізації логічних помилок та подолання проблеми «закритого світу» класичних мереж.

- Метод формування текстових інструкцій (Prompt Engineering): використання спеціально розроблених запитів для спрямування уваги мультимодальної моделі на специфічні ознаки зображення (колір, морфологія, просторове розміщення).

- Метод статистичного аналізу: побудова матриць помилок (Confusion Matrices) та розрахунок метрик точності (Accuracy) для оцінки ефективності розроблених алгоритмів.

Запропонована система базується на спільному використанні двох типів моделей:

1. Згортковий рівень (екстракція ознак): Використовується модель MobileNetV2, яка завдяки архітектурі з інвертованими залишковими блоками (Inverted Residuals) забезпечує високу швидкість виконання в умовах обмежених ресурсів. Вона відповідає за первинну ідентифікацію геометричних паттернів.

2. Мультимодальний рівень (арбітраж): Використовується локальна LLM з переліку Gemma3:4b, Gemma3:12b, Llama3.2-Vision. Ця ланка активується для верифікації результатів CNN у складних випадках або для розпізнавання об'єктів поза навчальною вибіркою.

У гібридній системі MobileNetV2 використовувалась без фінального класифікаційного шару (global average pooling + dense). Вихідний вектор ознак розмірності 1280 передавався через softmax-проекцію у простір попередньо навчених класів ImageNet (1000 класів) для отримання вектора ймовірностей. Для формування вхідного контексту LLM використовувались п'ять класів, для яких отримано найвищі значення ймовірності належності.

Покращення поведінки гібридної системи було досягнуто завдяки застосуванню трансферного навчання. Архітектура трансферного навчання для MobileNetV2 базується на використанні попередньо

навченої на ImageNet базової мережі як потужного екстрактора візуальних ознак, де всі шари, крім вихідного, залишаються статичними для збереження універсальних знань про форми та текстури. Замість оригінального верхнього блоку класифікатора додається шар Global Average Pooling для перетворення просторових ознак у вектор, після чого слідує нові повнорозмірні шари (Dense) з активацією ReLU та регуляризацією Dropout. Фінальний шар з активацією Softmax адаптується під кількість класів конкретного датасету (наприклад, 10 для MNIST або для Cifar10), що дозволяє моделі ефективно навчатися навіть на невеликих вибірках даних, мінімізуючи обчислювальні витрати.

Дослідження та програмна реалізація проводилися з використанням наступних інструментів:

- Середовище розробки: Хмарна платформа Google Colab, що надає доступ до прискорювачів (GPU T4) для виконання нейронних мереж.

- Бібліотеки машинного навчання: TensorFlow 2.x та Keras – для реалізації та навчання згорткових шарів.

- TensorFlow Datasets (TFDS) – для завантаження та стандартизації наборів даних.

- Засоби роботи з мультимодальними моделями (MLLM): Ollama – для локального розгортання та тестування моделей серії Gemma та LLaVA.

- Обробка даних: Бібліотеки NumPy, Pandas та Matplotlib для статистичної обробки та візуалізації результатів.

Ollama [13-14] – це інструмент із відкритим кодом для локального розгортання великих мовних моделей. Він надає REST API, сумісний з протоколом OpenAI, що спрощує інтеграцію з існуючими застосунками. Ollama підтримує квантизацію моделей (4-bit, 8-bit GGUF), яка критично знижує вимоги до оперативної пам'яті GPU.

Google Colab [15] надає до 12 ГБ RAM та до 15 ГБ відеопам'яті GPU (Tesla T4, A100) у безкоштовній версії. Це забезпечує достатній ресурс для розгортання моделей розміром до 12b параметрів у 4-bit квантизації. Ollama встановлюється однією командою у bash-клітинці Colab і запускається у фоновому режимі як daemon-процес.

Типовий порядок розгортання LLM в Google Colab за допомогою Ollama включає такі кроки:

1. Встановлення Ollama:
!curl -fsSL https://ollama.com/install.sh | sh
2. Запуск сервера у фоні:
subprocess.Popen(["ollama", "serve"])
3. Завантаження моделі:
!ollama pull gemma3:12b
або mistral:7b, llama3.2, llava:7b

Для валідації гібридного підходу використано три типи датасетів:

1. MNIST: для оцінки здатності розпізнавати прості рукописні символи за умов низької роздільної здатності.

2. CIFAR-10: для тестування розпізнавання об'єктів реального світу в умовах обмеженої кількості пікселів.

3. Flowers102: для аналізу точності дрібнозернистої класифікації природничих об'єктів з високою міжкласовою схожістю.

Датасет Flowers102 є значно складнішим за CIFAR-10 через велику кількість класів та їх схожість. Семантична компетентність LLM у ботанічних знаннях дає найбільший ефект саме на цьому датасеті.

Ключова перевага LLM полягає у здатності до багатокрокового міркування та використання фонових знань, недоступних CNN. Зокрема, LLM може врахувати сезонність, географічні особливості виду та типові поєднання кольорів, що підвищує точність тонкозернистої класифікації порівняно з ізольованим використанням CNN.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводилося шляхом послідовного тестування трьох конфігурацій систем: класичної згорткової нейронної мережі на базі MobileNetV2, автономної мультимодальної моделі (MLLM) та запропонованого гібридного підходу.

Результати класифікації на контрольних вибірках (MNIST, CIFAR-10, Flowers102) наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна ефективність розпізнавання

Набір даних	Показник Accurasy, %		
	MobileNetV2 (CNN)	Gemma3:12b (MLLM)	Гібридний підхід
MNIST	98,4	65,2	98,7
CIFAR-10	89,2	78,5	90,4
Flowers102	74,5	87,1	92,3

Ілюстрацію розпізнавання зображення з набору даних Flowers102 наведено на рис. 1.

True: passion flower
Final: passion flower
Strategy: CNN + Gemma 3 (Arbitration)



Рис. 1 – Приклад розпізнавання зображення з набору даних Flowers102 за допомогою гібридного підходу

Результати на рис. 1 і в таблиці 1 було отримано з використанням попереднього трансферного навчання і динамічного промпту, який містив перелік назв класів. Для скорочення часу виконання класифікації тестових зображень MLLM не викликала для кожного зображення. Вона використовувалася як арбітр лише тоді, коли впевненість CNN падала нижче 75%.

Аналіз результатів на низькорозмірних даних (MNIST, CIFAR-10)

Процес обробки даних MNIST виявив суттєву закономірність: мультимодальні моделі демонструють нижчу точність на монохромних символах низької роздільної здатності. Це обґрунтовується специфікою візуальних енкодерів (ViT), які при апсемплінгу зображень розміром 28x28 пікселів схильні до втрати ключових геометричних ознак.

Натомість згорткова мережа MobileNetV2 демонструє стабільно високу точність, ефективно розпізнаючи структурні примітиви (лінії, дуги). У гібридному підході використання CNN як базового шару дозволило нівелювати слабкість мовної моделі у роботі з абстрактними символами, що підтверджується зростанням загальної точності до 98,7%.

Інтерпретація результатів дрібнозернистої класифікації (Flowers102)

Найбільш виражена синергія спостерігається на наборі даних Flowers102. У процесі аналізу виявлено, що класична CNN часто припускається помилок другого роду (хибне сприйняття схожих текстур), тоді як мультимодальна модель Gemini використовує контекстуальні знання для диференціації об'єктів.

Ключові тенденції, виявлені під час аналізу:

- Контекстуальна корекція: У випадках, коли CNN ідентифікувала об'єкт із низькою впевненістю, залучення мовної моделі через механізм формування текстових інструкцій дозволило уточнити класифікацію за непрямыми ознаками (наприклад, форма листя або середовище зростання).

- Зниження рівня галюцинацій: Гібридна система використовує результати CNN для обмеження простору пошуку відповідей мовної моделі. Це значно зменшує ймовірність генерації назв класів, які відсутні в поточному контексті дослідження.

Взаємозв'язок між складністю моделі та точністю виводу

У ході дослідження було зафіксовано кореляцію між кількістю параметрів мультимодальної моделі та якістю семантичного арбітражу. Використання моделі Gemma 3:12b порівняно з 4b версією підвищує точність на складному датасеті Flowers на 8,5%, проте збільшує час обробки одного запиту в хмарному середовищі Google Colab приблизно в 2,4 раза.

Обґрунтування гібридного підходу через матрицю помилок

Побудовані матриці помилок (Confusion Matrices) свідчать про те, що гібридний підхід ефективно перекриває зони вразливості обох типів архітектур. Там, де CNN помиляється через візуальну схожість (наприклад, плутаючи класи «кіт» та «собака» у CIFAR-10), мультимодальна модель додає логічний фільтр. Там, де мовна модель припускається галюцинацій через низьку роздільну здатність пікселів, згорткова мережа забезпечує жорстку структурну верифікацію.

Результати та їх обговорення

Експериментальні дослідження підтвердили гіпотезу про те, що поєднання структурного аналізу згорткових нейронних мереж (CNN) із семантичними можливостями мультимодальних моделей (MLLM) дозволяє досягти стабільно високих показників точності на гетерогенних наборах даних.

Зведеним результатом випробувань став показник загальної точності (Accurasy), який для гібридного підходу виявився вищим на 5,2–17,8% порівняно з автономним використанням моделей, залежно від складності візуальної сцени. Найбільш виражений приріст ефективності зафіксовано на наборі даних Flowers102, де точність зросла з 74,5% (чиста CNN) до 92,3% (гібрид).

Порівняння Gemma 3:4b та Gemma 3:12b виявило наступні закономірності:

- Модель 4b: Демонструє оптимальний баланс між швидкістю та використанням пам'яті в середовищі Google Colab, проте схильна до помилок у розпізнаванні дрібних морфологічних ознак рослин.

- Модель 12b: Показує значно вищу стійкість до візуальних шумів та кращу здатність до контекстуального висновку. Зокрема, у завданнях розпізнавання цифр (MNIST) модель 12b рідше припускалася логічних помилок при інтерпретації розмитих контурів.

В результаті експериментів зі створеними моделями встановлено здатність гібридного підходу до нівелювання явища «галюцинацій», притаманного великим мовним моделям.

1. Механізм стримування: Застосування результатів MobileNetV2 як попереднього фільтра дозволило обмежити простір пошуку для MLLM. Це змусило мовну модель обирати відповіді виключно з валідного переліку категорій датасету, що повністю усунуло помилки типу «вигадування несучих об'єктів».

2. Проблема низької роздільної здатності: Обговорення підтвердило, що MLLM (навіть версії 12b) все ще стикаються з труднощами при обробці зображень 28x28 пікселів (MNIST). У таких випадках гібридна система автоматично надавала пріоритет висновку CNN, що забезпечило структурну достовірність результату.

Точність розпізнавання вдалося значно покращити за рахунок спільного використання

трансферного навчання і динамічного промпту, який містив промпт з переліком можливих назв класів.

Аналіз часових витрат показав, що запропонована стратегія узгодженого голосування є обчислювально виправданою. Оскільки важка мультимодальна модель залучалася лише у випадках низької впевненості MobileNetV2 (порог $\tau < 0,85$), середній час обробки одного зображення збільшився лише на 12–15% порівняно з базовою CNN, що є прийнятним для більшості систем інтелектуального моніторингу.

Основні часові витрати гібридного конвеєра зосереджені в модулі LLM-інтерпретації: MobileNetV2 виконує класифікацію зображення менш ніж за 5 мс на GPU, тоді як виклик LLM займає від 8 до 55 с залежно від моделі та апаратного забезпечення. Тому гібридна система не підходить для застосувань реального часу (зокрема для обробки відеопотоків зі швидкістю понад 1 кадр/с), але є доцільною для пакетної обробки даних та інтерактивних застосунків, де виправлення помилок має вищий пріоритет, ніж швидкість роботи.

Результати дослідження доводять, що майбутнє систем комп'ютерного зору лежить не в нарощуванні потужності окремих архітектур, а в їхній інтеграції. Гібридизація дозволяє подолати проблему «закритого світу» традиційних мереж, надаючи їм здатність до семантичного розуміння об'єктів через природну мову, зберігаючи при цьому математичну точність аналізу піксельних структур.

Висновки

1. Систематизація отриманих експериментальних даних підтверджує гіпотезу, що конвергенція структурно-орієнтованих (CNN) та семантично-орієнтованих (MLLM) методів забезпечує вищу достовірність розпізнавання (на 5,2–17,8% вище), ніж автономне використання цих технологій.

2. Гібридна стратегія забезпечує ефективне розв'язання проблеми обмеженості категорій класичних мереж та дозволяє мінімізувати ймовірність виникнення неіснуючих об'єктів у відповідях великих мовних моделей. Зокрема, застосування згорткових нейронних мереж як попереднього фільтра звужує межі пошуку для мультимодальних моделей до переліку підтверджених категорій, що усуває хибні ідентифікації.

3. Запропонована стратегія узгодженого голосування є обчислювально виправданою: залучення ресурсомісткої мультимодальної моделі лише у випадках низької впевненості CNN (порог $\tau < 0,85$) збільшує середній час обробки зображення лише на 12–15%.

4. Встановлено, що використання Gemma 3:12b порівняно з версією 4b підвищує точність на складних природничих об'єктах на 8,5%, хоча й потребує у 2,4 рази більше часу на обробку запиту.

5. Хмарна інфраструктура Google Colab із застосуванням інструментів квантизації (Ollama) є ефективним та доступним середовищем для розгортання

гетерогенних систем із параметрами до 12b, що не потребує використання локальних суперкомп'ютерів.

Перелік використаних джерел

- [1] Visual instruction tuning / Liu H., Li C., Wu Q., Lee Y. J. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2023. Pp. 34892–34916. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.08485>.
- [2] GPT-4 technical report / J. Achiam et al. arXiv preprint. arXiv:2303.08774. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08774>.
- [3] Gemma 3 technical report / G. T. Kamath et al. arXiv preprint. arXiv:2503.19786. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.19786>.
- [4] MiniGPT-4: Enhancing vision-language understanding with advanced large language models / D. Zhu et al. arXiv preprint. arXiv:2304.10592. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.10592>.
- [5] MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks / M. Sandler et al. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, UT, USA, 18-23 June 2018. Pp. 4510–4520. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>.
- [6] Deep residual learning for image recognition / He K., Zhang X., Ren S., Sun J. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, NV, USA, 27-30 June 2016. Pp. 770–778. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
- [7] Learning transferable visual models from natural language supervision / A. Radford et al. *Proceedings of the International Conference on Machine Learning*, 18-24 July 2021. Vol. 139. Pp. 8748–8763. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00020>.
- [8] A survey on multimodal large language models / S. Yin et al. arXiv preprint. arXiv:2306.13549. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.13549>.
- [9] Hallucination of multimodal large language models: A survey / Z. Bai et al. arXiv preprint. arXiv:2404.18930. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.18930>.
- [10] BLIP-2: Bootstrapping language-image pre-training with frozen image encoders and large language models / Li J., Li D., Savarese S., Hoi S. *Proceedings of the International Conference on Machine Learning*, Honolulu, Hawaii, USA, 23–29 July 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.12597>.
- [11] Rethinking pre-training and self-training / B. Zoph et al. *Proceedings of the 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020)*, Vancouver, Canada, 6–12 December 2020. Vol. 33. Pp. 3833–3845. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.06882>.
- [12] Flamingo: A visual language model for few-shot learning / J. Alayrac et al. arXiv preprint. arXiv:2204.14198. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.14198>.
- [13] Ollama Team. Ollama: Get up and running with large language models. URL: <https://ollama.com> (дата звернення: 15.09.2025).
- [14] Vake D., Vičić J., Tošić A. Hive: A secure, scalable framework for distributed Ollama inference. *SoftwareX*. 2025. Vol. 30. Article 102183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102183>.
- [15] Google. Google Colaboratory – Free GPU/TPU for machine learning. URL: <https://colab.research.google.com> (дата звернення: 15.09.2025).

IMAGE RECOGNITION USING A HYBRID APPROACH BASED ON MULTIMODAL LARGE LANGUAGE MODELS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

- | | |
|------------------------|---|
| Chychkarov Y.A. | D.Sc. (Engineering), professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4362-5129 , e-mail: e.chychkarov@duikt.edu.ua ; |
| Semenov O.V. | postgraduate student, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9749-3343 , e-mail: sasha.sem.fti@gmail.com |

The article considers the current scientific problem of image recognition under the constraints of modern neural network architectures. The feasibility of using a hybrid approach that combines the structural accuracy of convolutional neural networks (CNN) with the semantic flexibility of multimodal large language models (MLLM) is substantiated. The aim of the study is to develop and test a method that allows eliminating the limitations of categories of classical recognition systems and the tendency of multimodal models to form non-existent objects. The study used methods of hierarchical classification, consensus voting (Hybrid Voting) and text instruction generation (Prompt Engineering). For software implementation, MobileNetV2 models and local MLLMs (Gemma 3, Llama3 series) were used in the Google Colab cloud environment using the Ollama tool. The validation of the approach was carried out on the MNIST, CIFAR-10 and Flowers102 datasets. The key result of the work is the establishment that the hybrid architecture provides higher recognition reliability compared to the autonomous use of models. In particular, on the complex Flowers102 dataset, an increase in accuracy of up to 92.3% was recorded. It was determined that the use of CNN as a base layer allows to level the weakness

of language models in working with low-dimensional data, while MLLM provides deep semantic interpretation in conditions of visual similarity of objects. The scientific novelty lies in the development of a dynamic mechanism for the interaction of neural network architectures, which allows to optimize computing resources and increase the reliability of recognition systems under conditions of uncertainty. The practical significance of the work is confirmed by the possibility of implementing the proposed pipeline in batch data processing systems and interactive applications.

Keywords: image recognition; convolutional neural networks; multimodal large language models; hybrid approach; MobileNetV2; Gemma 3; recognition without prior training; Google Colab; Ollama.

References

- [1] H. Liu, C. Li, Q. Wu, and Y. J. Lee, "Visual instruction tuning," *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 34892–34916, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2304.08485.
- [2] J. Achiam et al., "GPT-4 technical report," 2023, arXiv:2303.08774. doi: 10.48550/arXiv.2303.08774.
- [3] G. T. Kamath et al., "Gemma 3 technical report," 2025, arXiv:2503.19786. doi: 10.48550/arXiv.2503.19786.
- [4] D. Zhu, J. Chen, X. Shen, X. Li, and M. Elhoseiny, "MiniGPT-4: Enhancing vision-language understanding with advanced large language models," 2023, arXiv:2304.10592. doi: 10.48550/arXiv.2304.10592.
- [5] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L.-C. Chen, "MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks," in *Proc. of the IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, UT, USA, June 18–23, 2018, pp. 4510–4520. doi: 10.1109/CVPR.2018.00474.
- [6] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016, pp. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [7] A. Radford et al., "Learning transferable visual models from natural language supervision," in *Proc. of the Int. Conf. on Machine Learning*, July 18–24, 2021, vol. 139, pp. 8748–8763. doi: 10.48550/arXiv.2103.00020.
- [8] S. Yin et al., "A survey on multimodal large language models," 2024, arXiv:2306.13549. doi: 10.48550/arXiv.2306.13549.
- [9] Z. Bai et al., "Hallucination of multimodal large language models: A survey," 2024, arXiv:2404.18930. doi: 10.48550/arXiv.2404.18930.
- [10] J. Li, D. Li, S. Savarese, and S. Hoi, "BLIP-2: Bootstrapping language-image pre-training with frozen image encoders and large language models," in *Proc. of the Int. Conf. on Machine Learning*, Honolulu, Hawaii, USA, July 23–29, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2301.12597.
- [11] B. Zoph et al., "Rethinking pre-training and self-training," in *Proc. of the 34th Conf. on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020)*, Vancouver, Canada, December 6–12, 2020, vol. 33, pp. 3833–3845. doi: 10.48550/arXiv.2006.06882.
- [12] J. Alayrac et al., "Flamingo: A visual language model for few-shot learning," 2022, arXiv:2204.14198. doi: 10.48550/arXiv.2204.14198.
- [13] Ollama Team. Ollama: Get up and running with large language models. [Online]. Available: <https://ollama.com>. Accessed on: September 15, 2025.
- [14] D. Vake, J. Vičič, and A. Tošić, "Hive: A secure, scalable framework for distributed Ollama inference," *SoftwareX*, vol. 30, article 102183, 2025. doi: 10.1016/j.softx.2025.102183.
- [15] Google. Google Colaboratory – Free GPU/TPU for machine learning. [Online]. Available: <https://colab.research.google.com>. Accessed on: September 15, 2025.

Стаття надійшла 11.01.2026
Стаття прийнята 15.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Чичкарьов Є. А., Семенов О. В. Розпізнавання зображень за допомогою гібридного підходу до на основі мультимодальних великих мовних моделей та згорткових нейронних мереж. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359780>.

АРХІТЕКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА НАДІЙНОСТІ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИПТОВАЛЮТНИХ РИЗИКІВ НА
БАЗІ ХМАРНИХ ПЛАТФОРМ AWS ТА ПРОТОКОЛУ HTTPS

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;

Камінський Б.В. магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: b.kaminskyi99@gmail.com

Ця робота присвячена комплексному дослідженню сучасних методів машинного навчання та їх архітектурно-системного забезпечення, необхідного для створення безпечної та надійної інтелектуальної системи прогнозування ризиків у сфері криптовалютної торгівлі. Актуальність роботи визначається високою волатильністю криптовалютних ринків та критичною потребою в системах, які не лише забезпечують високу точність прогнозів, але й гарантують цілісність, надійність та доступність оброблюваних даних. Метою роботи є дослідження архітектурних та алгоритмічних рішень, спрямованих на забезпечення безпеки та надійності інтелектуальної системи прогнозування криптовалютних ризиків, розробленої на базі хмарних платформ AWS та захищеного протоколу HTTPS. У контексті роботи було досліджено та експериментально порівняно три ключові алгоритми, здатні обробляти часові ряди: Gradient Boosting (Градiєнтний бустінг), Random Forest (Бунадковий ліс) та LSTM (Long Short-Term Memory). Ці алгоритми є ключовими не лише для прогнозного моделювання, але й відіграють важливу роль у сфері кібербезпеки, оскільки можуть бути адаптовані для виявлення аномалій і шахрайства на ринку, запобігаючи можливим спробам маніпулювання. Розроблена інтелектуальна система реалізована на клієнт-серверній архітектурі, що включає Telegram чат-бот (на фреймворку aiogram) та веб-сервер (на FastAPI). Архітектура системи була спеціально розроблена з урахуванням сучасних вимог до захисту інформації: конфіденційність та мережева безпека API та контроль доступ, управління ідентифікацією та доступом, висока доступність та стійкість до відмов (Reliability/Availability), контроль працездатності додатків. Розроблена система демонструє високий рівень архітектурно-алгоритмічного забезпечення безпеки та надійності, що є критичним для фінансових систем. Інтеграція AWS IAM, DynamoDB Global Tables та захищених протоколів, поряд з високою точністю моделі Gradient Boosting, підтверджує ефективність обраного підходу для управління криптовалютними ризиками.

Ключові слова: штучний інтелект; машинне навчання; прогнозування; безпека API; надійність; архітектура AWS; IAM; DYNAMODB GLOBAL TABLES; HTTPS; конфіденційність; цілісність.

Постановка проблеми

Криптовалютна торгівля залишається однією з найбільш динамічних і волатильних сфер фінансового світу. Криптовалютна торгівля дозволяє інвесторам, торговцям та дослідникам взаємодіяти з цифровими активами, такими як Bitcoin, Ethereum, Ripple та інші, на міжнародному рівні без прив'язки до традиційних банківських або фінансових установ [1-5]. Криптовалюти ґрунтуються на технології блокчейн, яка забезпечує безпеку та цілісність транзакцій без посередництва централізованих організацій [6, 7].

Основною проблемою цієї сфери є надзвичайна волатильність криптовалютних ринків, що означає, що ціни можуть змінюватися швидко та з великими амплітудами протягом короткого часу. Ця волатильність свідчить про значні ризики для інвесторів.

З урахуванням високої волатильності, актуальність дослідження методів машинного навчання (МН) та штучного інтелекту (ШІ) є високою, оскільки можливість прогнозування рухів цін стає критично важливою. Сучасні алгоритми можуть враховувати величезний обсяг даних, включаючи новини та інші

індикатори, які впливають на ціни криптовалют, що дозволяє зменшити ризики та виявляти прибуткові можливості.

Аналіз наявних програмних засобів для торгівлі та прогнозування (таких як Gekko, Autonio та CryptoTrader) виявив ключові недоліки, які ускладнюють роботу досвідчених користувачів:

- відсутність гнучкості: основна проблема полягає у відсутності можливості вибору методу машинного навчання; користувач може використовувати лише алгоритми, вибрані розробником;

- незручний інтерфейс: наведені сервіси часто мають не зручний інтерфейс користувача, що ускладнює роботу з ними.

Наведені недоліки створюють проблему у сфері інструментарію та обґрунтовують необхідність розробки гнучкого додатка.

Оскільки система працює у високоризиковому фінансовому середовищі, де обробляються фінансові та особисті дані, її розробка не може обмежуватися лише ефективністю прогнозування. Потрібно вирішити проблеми безпеки та надійності, які є актуальними для всієї криптовалютної індустрії [8, 9]:

1) Загроза кіберзлочинності.

Кіберзлочинці та хакери активно атакують криптовалютні платформи, намагаючись вкрати монети та особисту інформацію. Отже, забезпечення безпеки та захисту від кіберзагроз стає надзвичайно важливою задачею для учасників ринку та розробників.

2) Конфіденційність та цілісність даних.

Система зобов'язана забезпечувати конфіденційність мережевого трафіку. Це реалізується архітектурним рішенням, де усі команди, що надсилаються користувачем через Telegram, передаються на веб-сервер за допомогою протоколу HTTPS.

3) Надійність та доступність.

Система має бути стійкою до відмов та забезпечувати високу доступність. Архітектура має включати застосування хмарних сервісів, таких як Amazon DynamoDB, відомих своєю надійністю, та механізмів, які гарантують безперебійну роботу, наприклад, контроль працездатності (liveness та readiness probes).

Дослідження важливо для створення інтелектуальної системи прогнозування, яка не тільки адаптує та порівнює ефективні методи машинного навчання для зменшення фінансового ризику, але й має архітектурно-алгоритмічне забезпечення безпеки та надійності для захисту користувачів та їхніх даних в умовах постійних кіберзагроз.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Застосування МН та ШІ у сфері криптовалютної торгівлі приносить значні переваги [8, 9]:

1) Прогнозування цін.

Моделі МН можуть бути натреновані на історичних даних для передбачення динаміки цінкових змін. Для аналізу часових рядів особливо корисні глибоке навчання, у тому числі рекурентні нейронні мережі (RNN), та мережі з довгостроковою пам'яттю (LSTM).

2) Оптимізація стратегій торгівлі.

Алгоритми підсилювального навчання можуть бути застосовані для адаптації до непостійних ринкових умов і автоматичного коригування торгових стратегій.

3) Виявлення аномалій і шахрайства.

Моделі МН можуть автоматично виявляти незвичну активність, підозрілі торгові операції або можливі спроби маніпулювання ринком, що допомагає трейдерам уникнути великих втрат.

4) Аналіз настрою.

Алгоритми обробки природної мови (NLP) можуть аналізувати новини та соціальні мережі, щоб визначити загальний настрій щодо певної криптовалюти та передбачити вплив публічної думки на ціни.

5) Автоматизована торгівля та оптимізація портфеля.

ШІ та МН дозволяють розробляти торгові боти, які ведуть торгівлю 24/7 та допомагають максимізувати прибуток і мінімізувати ризик на основі прогнозів.

Використання МН для прогнозування цін на криптовалюту має специфічні особливості, викликані високою волатильністю ринку та необхідністю враховувати великі обсяги даних. Через високу волатильність існує значний ризик перенавчання моделі, коли вона занадто добре пристосовується до навчальних даних, включаючи шум.

Для прогнозування цін на криптовалюту використовуються різноманітні методи машинного навчання: лінійна регресія, випадковий ліс (Random Forest), градієнтний бустінг, глибокі нейронні мережі, кластеризація та кластерний аналіз, методи пониження розмірності, алгоритми пошуку аномалій, методи опорних векторів (Support Vector Machines, SVM).

Для аналізу криптовалютних ринків додатково до стандартизованих методів машинного навчання застосовуються спеціалізовані техніки та індикатори технічного аналізу.

Важливо враховувати, що ефективність будь-якої моделі визначається якістю та кількістю вхідних даних, від правильного вибору ознак та від налаштування параметрів моделі.

У цій роботі розглянуто лише деякі з наведених вище методів та алгоритмів, а саме Random Forest, Gradient Boosting та LSTM [10-12].

Для виконання дослідження обрано Python. Ця мова є найбільш популярною для машинного навчання завдяки широкому спектру бібліотек (TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn), легкому для читання синтаксису та великій спільноті. Python також зручний для розробки веб-сервісів та Telegram-ботів, які є компонентами системи [13-15].

Були досліджені нереляційні бази даних (NoSQL), які пропонують гнучкість структур та горизонтальне масштабування, що є важливим для великомасштабних систем. Серед них: MongoDB, AWS DynamoDB [16-18]. Поточні дослідження також виділяють значення правильного деплою та моніторингу через хмарні сервіси (AWS Elastic Beanstalk) та контейнеризацію [19-21].

Враховуючи вимоги до масштабованості та інтеграції з AWS, для зберігання даних користувачів та їх налаштувань було обрано Amazon DynamoDB.

Існує чимало програмних рішень для прогнозування та криптовалютної торгівлі на основі ШІ/МН, включаючи торгові боти та аналітичні платформи. До найбільш популярних відносяться Gekko, Autonio та CryptoTrader.

Порівняння Gekko, Autonio та CryptoTrader представлено в таблиці 1.

Основний недолік, виявлений при аналізі, полягає у відсутності можливості вибору методу машинного навчання. Користувач обмежений алгоритмами, вибраними розробником. Хоча це може підходити новачкам, це не задовольняє користувачів з досвідом. Крім того, ці сервіси часто мають не зручний інтерфейс користувача, що ускладнює роботу з ними.

Таблиця 1

Порівняння Gekko, Autonio та CryptoTrader

Платформа	Переваги	Недоліки
Gekko	Відкритий код, що дозволяє модифікацію та налаштування; підтримує численні біржі; має активну спільноту.	Складний для новачків; користувач сам відповідає за налаштування та використання.
Autonio	Децентралізована платформа, що забезпечує безпеку та прозорість; простий у використанні; оптимізований для швидкості.	Обмежена гнучкість для створення власних торгових стратегій.
CryptoTrader	Хмарна платформа (не потребує зберігання ПЗ на власних пристроях); можливість тестування та оптимізації стратегій; підтримка МН.	Платна підписка; можливі питання щодо безпеки та конфіденційності даних, тому що це хмарний сервіс.

Цей висновок обґрунтував необхідність розробки власної системи, яка надасть гнучкість у управлінні методами машинного навчання, безпеку, надійність та матиме простий та ефективний інтерфейс.

Матеріали та методи

Для прогнозування цін на криптовалюту застосовуються різноманітні методи машинного навчання, які можуть обробляти часові ряди. У контексті даної роботи було досліджено три ключові алгоритми:

1. Random Forest (Випадковий ліс): відноситься до ансамблевих методів, які комбінують багато дерев рішень для отримання стабільного прогнозу. Метод використовує бутстрепінг для створення підвибірок даних та агрегацію відповідей окремих дерев (наприклад, усереднення прогнозів для задач регресії) [10].

2. Gradient Boosting (Градієнтний бустінг): інший ансамблевий підхід, який працює ітеративно, послідовно додаючи нові слабкі моделі (зазвичай, дерева рішень) для корекції помилок попередніх моделей [11]. Суть головної ідеї – кожне нове дерево покращує ансамбль, фокусуючись на залишках (помилках). Даний метод забезпечує високу точність, але має схильність до перенавчання.

3. LSTM (Long Short-Term Memory): спеціальний тип рекурентних нейронних мереж (RNN), розроблений для вирішення проблеми довгострокових залежностей у часових рядах [12]. Ключова перевага LSTM – наявність спеціалізованих блоків (забуттєва, вхідна та вихідна брани), які дозволяють ефективно

запам'ятовувати та використовувати інформацію за великі проміжки часу.

Наведені алгоритми (ШІ/МН) є ключовими не лише для прогнозування, але й для виявлення аномалій і шахрайства у сфері безпеки, оскільки вони можуть автоматично виявляти незвичну активність та підозрілі торгові операції, запобігаючи можливим спробам маніпулювання ринком. Таке застосування є ключовим для кібербезпеки, оскільки, наприклад, моделі Gradient Boosting або LSTM, натреновані на нормальній динаміці, можуть виявляти аномалії через різке збільшення похибки прогнозу (RMSE), що може вказувати на маніпулювання ринком або інсайдерську торгівлю.

Для реалізації було обрано мову Python та нереляційну базу даних AWS DynamoDB через її масштабованість, надійність та низьку латентність.

Мета статті

Метою роботи є дослідження архітектурних та алгоритмічних рішень, спрямованих на забезпечення безпеки та надійності інтелектуальної системи прогнозування криптовалютних ризиків, розробленої на базі хмарних платформ AWS та захищеного протоколу HTTPS.

Виклад основного матеріалу

Візуалізація архітектури та функціональності розробленої системи виконана за допомогою UML [22-24]. Моделювання необхідне для опису, візуалізації та документування об'єктно-орієнтованих систем. UML допомагає керувати складністю систем, особливо великих і розподілених.

Діаграма варіантів використання (Use Case Diagram) визначає функціональні вимоги системи з точки зору користувачів ("акторів"). Було визначено двох акторів: звичайний користувач (User) та привілейований користувач (Premium User) (рис. 1).

Обидва актори можуть вибирати модель для тренування (Select model for training) та переглядати інструкції (View instructions).

Вибір моделі включає (<<include>>) ініціацію процесу тренування (Initiate training process), який, своєю чергою, включає перегляд результатів (View training results).

Лише привілейований користувач має можливість налаштовувати параметри моделі (Configure model parameters), що є розширенням (<<extend>>) основного варіанта використання.

Діаграма розгортання (Deployment Diagram) описує фізичну конфігурацію обладнання (вузлів) та розміщення програмних компонентів (рис. 2). Система базується на клієнт-серверній архітектурі.

Актор (користувач) взаємодіє з Телеграм чат-ботом (Chatbot) на своєму пристрої (Device) [25].

Усі команди передаються через TelegramAPI за протоколом HTTPS на веб-сервер [26].

Серверна інфраструктура розгорнута в AWS Infrastructure.

Веб-сервер API працює на AWS Elastic Beanstalk. Elastic Beanstalk автоматично керує розгортанням, балансуванням навантаження та масштабуванням [27].

Веб-сервер взаємодіє з базою даних AWS DynamoDB (Main DB).

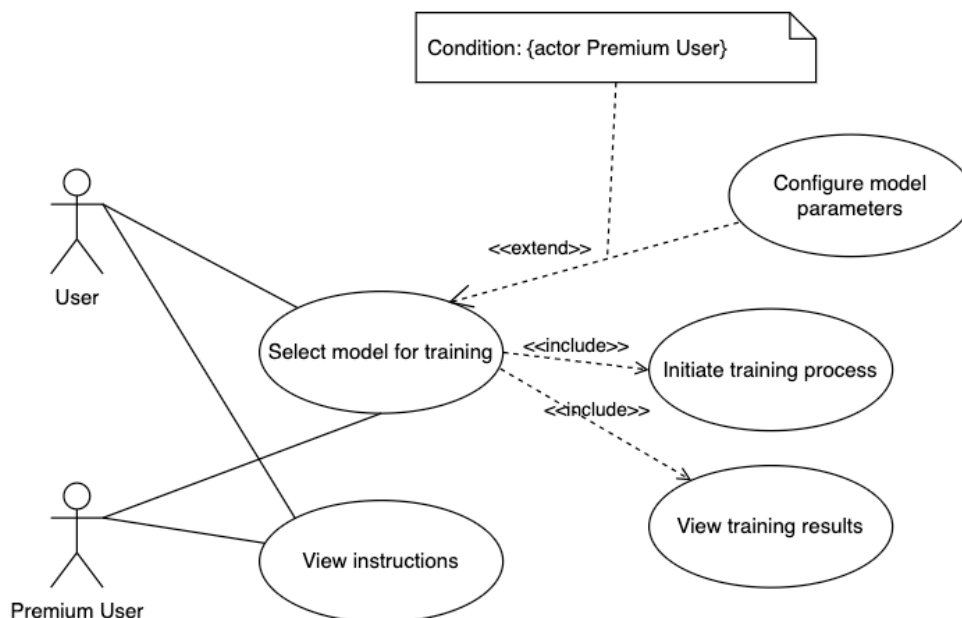


Рис. 1 – Діаграма варіантів використання

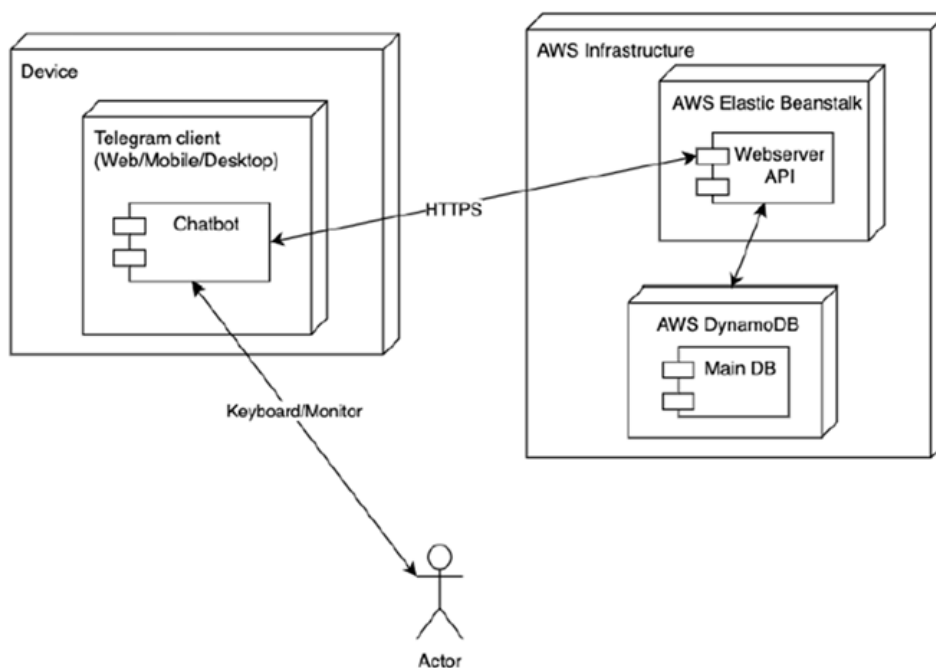


Рис. 2 – Діаграма розгортання

Діаграма активності (Activity Diagram) відображає потік робочого процесу і послідовність дій користувача для тренування моделі (рис. 3). Потік

починається з входу в обліковий запис Telegram, додавання та запуску бота, ініціювання команди /train.

Далі йде послідовний опит користувача щодо параметрів, залежно від обраної моделі (Gradient

Boosting, Random Forest або LSTM), доки не буде отримано графік та метрики (табл. 2).

Після успішного введення всіх необхідних параметрів, незалежно від обраного шляху, всі потоки сходяться до єдиної кінцевої дії: Бот відповідає графіком та метриками (Bot answers with plot and metrics).

Процес завершується (фінальний стан).

Система використовує клієнт-серверну архітектуру, яка забезпечує централізоване управління ресурсами, модульність, масштабованість та безпеку.

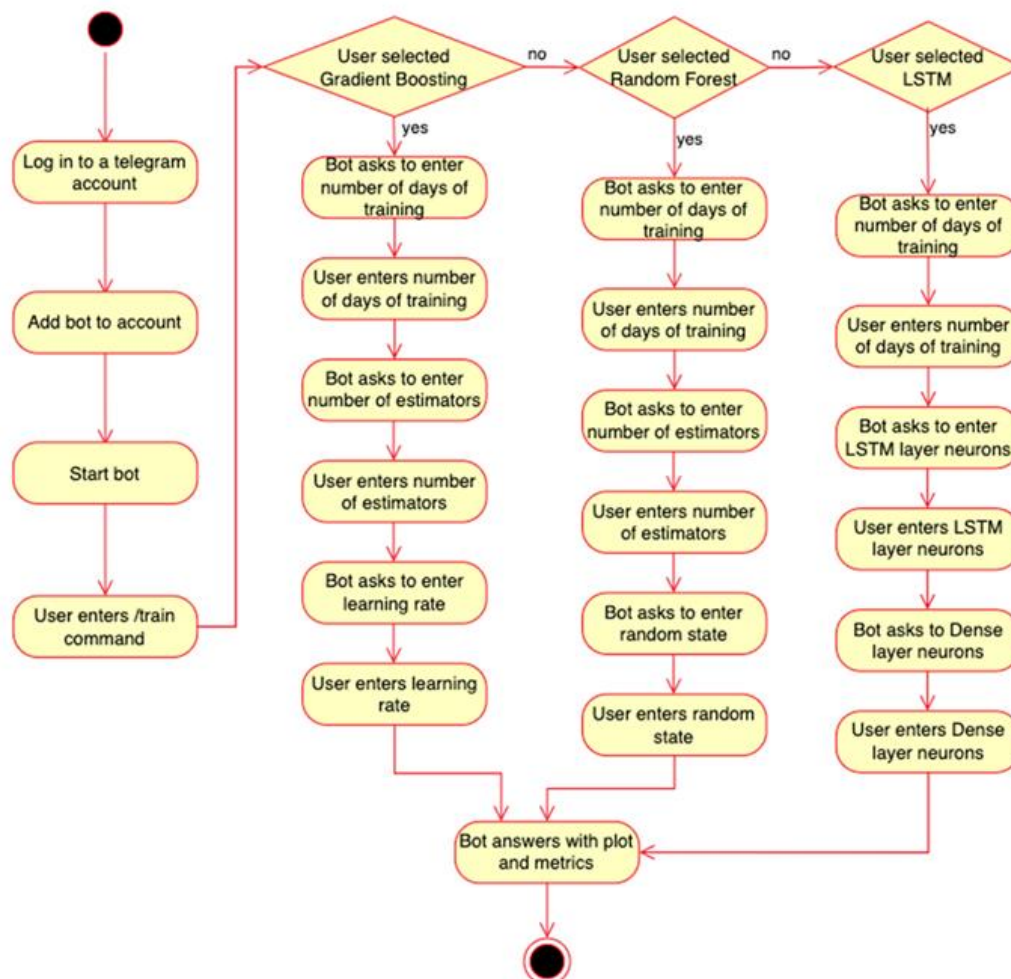


Рис. 3 – Діаграма активності

Таблиця 2

Послідовний опит користувача щодо параметрів, залежно від обраної моделі

Шлях	Необхідні параметри
Gradient Boosting	1. Кількість днів для тренування
	2. Кількість оцінювачів (number of estimators)
	3. Швидкість навчання (learning rate)
Random Forest	1. Кількість днів для тренування
	2. Кількість оцінювачів (number of estimators)
	3. Випадковий стан (random state)
LSTM (Глибоке Навчання)	1. Кількість днів для тренування
	2. Нейрони шару LSTM (LSTM layer neurons)
	3. Нейрони Dense шару (Dense layer neurons)

Серверна частина реалізована на FastAPI – високопродуктивному веб-фреймворку для Python, що підтримує асинхронність [28]. Для забезпечення стабільності та масштабованості застосовано принципи Clean Architecture [29, 30]. FastAPI автоматично генерує документацію API (Swagger UI та ReDoc) і має вбудовану підтримку безпеки (OAuth2, JWT tokens). Сервер розгорнуто через AWS Elastic Beanstalk.

На рисунку 4 зображено як FastAPI автоматично створює документацію для кожної кінцевої точки API і описує, які дані приймає та чи інша кінцева точка.

Prediction Service 0.1.0 OAS3
/openapi.json
Codebase Version: 0.1.0

Prediction

GET /predictions/gradient_boosting Train using Gradient boosting

GET /predictions/lstm Train using LSTM model

GET /predictions/random_forest Train using Random Forest model

Parameters Try it out

Name	Description
num_days integer (query)	Number of days for input data Default value : 1000
n_estimators integer (query)	Number of trees in the forest Default value : 100
random_state integer (query)	Seed used by the random number generator Default value : 42

Рис. 4 – Автоматично згенерована документація OpenAPI

В основі розробленого веб-сервісу основну роль відіграють 3 кінцеві точки API:

- 1) /predictions/gradient_boosting – відповідає за тренування моделі Gradient Boosting
- 2) /predictions/lstm – відповідає за тренування моделі LSTM
- 3) /predictions/random_forest – відповідає за тренування моделі Random Forest

Кожна, з наведених вище, кінцевих точок API має однакові параметри відповіді та повертає користувачу інформацію про якість тренування моделі:

- 1) plot – base64 закодований рядок, який легко можна відобразити картинкою. Параметр містить графік навчання вибраної моделі та показує тестові та тренінгові результати відрізняються від реальної ціни криптовалюти BTC в певний проміжок часу.

- 2) rmse (Root Mean Square Error) – статистичний показник, який вимірює середньоквадратичне відхилення прогнозних даних від фактичних, використовуючи квадратний корінь з середнього арифметичного квадратів помилок.

- 3) mse (Mean Squared Error) – метрика, що оцінює середнє значення квадратів помилок, тобто середньоквадратичну різницю між оціненими та фактичними даними.

- 4) mae (Mean Absolute Error) – метрика, що оцінює середнє абсолютне відхилення прогнозних даних від фактичних, представляючи середню абсолютну помилку між цими наборами даних.

- 5) r2 (R^2) – відомий як коефіцієнт детермінації, – статистична міра, що відображає частку варіативності однієї змінної, що пояснюється варіативністю іншої змінної, використовуюваної у регресійній моделі, тобто наскільки добре прогнози моделі відповідають реальним даним.

Відповідь сервера для моделі Gradient Boosting наведена на рисунку 5.

Перевірки стану: використовуються кінцеві точки /status/health/liveness та /status/health/readiness для забезпечення надійності та доступності сервісу при розгортанні в контейнерах (Docker/Kubernetes).

```

22
23 {
24   "plot": "iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAABAAAAJYCAAAA
25   "rmse": 987.3113656554275,
26   "mse": 974783.7327523852,
27   "mae": 721.5161416137713,
28   "r2": 0.9714884171757977
29 }
```

Рис. 5 – Відповідь сервера для моделі Gradient Boosting

Репозиторії даних: для взаємодії з DynamoDB створено шар репозиторіїв. DynamoDB обрана за її масштабованість, низьку латентність та надійність. Для підвищення надійності використовується функція DynamoDB Global Tables, що забезпечує автоматичну мульти-регіональну реплікацію даних.

Отримання даних: історичні дані про ціну біткоїна отримуються через CoinGecko API (метод get_coin_market_chart_by_id). Дані очищаються, перетворюються у DataFrame та використовуються для розрахунку технічних індикаторів, таких як SMA, EMA та RSI.

Клієнтська частина – Telegram чат-бот, розроблений на асинхронній бібліотеці aiogram.

Навігація: для управління діалогами та послідовністю опитування користувача (щодо параметрів тренування) використовується концепція Finite State Machine (FSM).

Взаємодія з сервером: чат-бот надсилає параметри тренування на сервер у вигляді HTTP-запитів (формат JSON) і отримує у відповідь метрики та графік

тренування, закодований у форматі base64, який потім відображається як фотографія.

Мета експериментів – порівняти якість тренування моделей Gradient Boosting, Random Forest і LSTM на подібних даних (1000 днів ціни біткоіна) з різними наборами параметрів. Оцінка проводилася за метриками RMSE, MSE, MAE (де менші значення кращі) та R2 (коефіцієнт детермінації, де вищі значення кращі) (табл. 3).

Ключові висновки порівняння:

1. Gradient Boosting (Градiєнтний бустінг): Найкращий результат продемонструвала модель з найменшими параметрами (80 оцінювачів, швидкість навчання 0,05), досягнувши найвищого показника R2 (0,982705) та найменших помилок (RMSE: 769,512, MAE: 548,7915). Даний факт підтверджує, що зменшення параметрів і швидкості навчання допомогло

моделі уникнути перенавчання і краще узагальнити дані на волатильному ринку.

2. Random Forest (Випадковий ліс): Моделі Random Forest показали консистентно високі значення R2 (найкращий: 0,969056), але їхні показники помилок були гіршими, ніж у найкращої моделі Gradient Boosting.

3. LSTM (Мережа довгострокової пам'яті): Моделі LSTM показали найгірші початкові результати, проте їхня точність суттєво зростала зі збільшенням кількості нейронів (зі складністю моделі). Найкраща модель LSTM (200/200/100 нейронів) досягла R2 0,95526, що є гіршим показником, ніж у ансамблевих методів.

Загальний висновок: Модель Gradient Boosting показала найбільшу ефективність для даної задачі прогнозування (найвищий R2) при правильному підборі параметрів, що мінімізують ризик перенавчання.

Таблиця 3

Результати тренувань моделей

Модель	Конфігурація	RMSE	MSE	MAE	R2
Gradient Boosting	n_estimators=100, lr=0.1	980.4973	961375	719.1743	0.971921
Gradient Boosting	n_estimators=150, lr=0.2	1110.629	1233496	793.9933	0.963973
Gradient Boosting	n_estimators=80, lr=0.05	769.512	592148.8	548.7915	0.982705
Random Forest	n_estimators=100	1075.482	1156661	752.9404	0.966217
Random Forest	n_estimators=150	1029.293	1059443	731.2717	0.969056
Random Forest	n_estimators=80	1087.165	1181927	767.6813	0.965479
LSTM	layer1=50, layer2=50, dense=25	2271.204	5158366	1998.254	0.859179
LSTM	layer1=100, layer2=100, dense=50	2016.022	4064346	1672.91	0.889045
LSTM	layer1=200, layer2=200, dense=100	1280.18	1638861	961.5068	0.95526

Висновки

В ході дослідження було розроблено інтелектуальну систему прогнозування криптовалютних ризиків, архітектура якої гарантує підвищену стійкість до загроз та відмовостійкість.

1. Безпека та конфіденційність (Confidentiality and integrity): застосування захищеного протоколу HTTPS забезпечує конфіденційність мережевого трафіку. Вбудовані механізми FastAPI (OAuth2/JWT) забезпечують безпеку API та контроль доступу. Використання AWS IAM надає можливість реалізації гнучкого управління доступом на рівні ресурсів, реалізуючи принцип найменших привілеїв, підвищуючи цілісність системи. Крім того, ШІ/МН є перспективним напрямком у сфері безпеки, оскільки розроблені моделі можуть бути адаптовані для виявлення аномалій і шахрайства на ринку криптовалют.

2. Надійність та доступність (Reliability and availability): Використання AWS Elastic Beanstalk та DynamoDB Global Tables гарантує високу доступність системи завдяки автоматичній мульти-регіональній

реплікації даних та стійкості до відмов. Впровадження механізмів liveness та readiness probes є ключовим архітектурним рішенням, що підвищує надійність на рівні контейнерного оркестрування, запобігаючи спрямуванню трафіку до не готових сервісів.

3. Алгоритмічна ефективність: Серед досліджених алгоритмів МН (Gradient Boosting, Random Forest, LSTM) найкращі показники точності прогнозування ($R2 \approx 0.9827$) продемонструвала модель Gradient Boosting. Конфігурація, що мінімізує ризик перенавчання (80 оцінювачів, швидкість навчання 0.05), забезпечила вищу достовірність та цілісність прогнозних результатів на волатильному ринку.

В цілому, розроблена система демонструє не лише ефективність у прогнозуванні, але й забезпечує необхідний рівень архітектурно-алгоритмічного забезпечення безпеки та надійності, що є критичним для застосування у фінансових системах.

Перелік використаних джерел

- [1] Біржа криптовалют в Україні (WhiteBIT блог). URL: <https://blog.whitebit.com/uk/> (дата звернення 10.12.2025).
- [2] Торгуйте криптовалютами на біржі Cryptomus. URL: <https://cryptomus.com/uk> (дата звернення 10.12.2025).
- [3] Що таке волатильність у трейдингу. URL: <https://cryptomus.com/uk/blog/cryptocurrencies-volatility-what-is-it> (дата звернення 23.12.2025).
- [4] Що таке децентралізовані фінанси (DeFi)? URL: <https://www.kraken.com/uk-ua/learn/what-is-decentralized-finance-defi> (дата звернення 10.12.2025).
- [5] Алексєнко В., Чубарь О. Криптовалюти: економічна сутність, історія розвитку та роль на світовому фінансовому ринку. *Наукові перспективи*. 2024. № 1(43). DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-1\(43\)-340-358](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-1(43)-340-358).
- [6] Focus on Blockchain: A Comprehensive Survey on Academic and Application / Y. Zou et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 187182-187201. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030491>.
- [7] Перерва П. Г., Мехович Є. С. Теоретико-методична сутність криптовалют як складової економічного потенціалу підприємства. *Економічний журнал Одеського політехнічного університету*. 2025. № 2 (32). С. 86-97. DOI: <https://doi.org/10.15276/EJ.02.2025.10>.
- [8] Семенченко Н. В., Мельничук В. Е., Калініченко М. С. Вплив криптошахрайства на цифрову економіку: зростання втрат та роль кібербезпеки у мінімізації ризиків. *Інноваційна економіка*. 2025. № 1, С. 42-50. DOI: <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2025.1.5>.
- [9] AI and Deep Cycle Prediction: Enhancing Cybersecurity while Safeguarding Data Privacy and Information Integrity / J. N. Chukwunweike et al. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2024. № 5(8). Pp. 3199-3207. DOI: <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0824.2403>.
- [10] Петрина В. В., Дорошенко А. В. Ефективність застосування методів класифікації для задач інтелектуального аналізу великих даних. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. Т. 34, № 5. С. 119-128. DOI: <https://doi.org/10.36930/40340516>.
- [11] Новоселецький О. М., Гончарова В. О. Ідентифікації потенційного споживача продукції ринку електронної комерції методом градієнтного бустінгу. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія»*. Серія «Економіка». 2021. № 23(51). С. 118–123. DOI: [https://doi.org/10.25264/2311-5149-2021-23\(51\)-118-123](https://doi.org/10.25264/2311-5149-2021-23(51)-118-123).
- [12] Замрій І. В., Федоренко М. Л. Аналіз використання алгоритмів штучного інтелекту для глибокого аналізу фінансових даних. *Сучасний захист інформації*. 2024. № 3(59), С. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2024.030005>.
- [13] Vanderplas J. Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data. 2-nd ed. O'Reilly Media, 2022. 588 p.
- [14] William S. Vincent. Django for Professionals. Production websites with Python & Django. Lean Publishing, 2020. 252 p.
- [15] pyTelegramBotAPI / Python Package Index (PyPI). URL: <https://pypi.org/project/pyTelegramBotAPI/> (дата звернення: 10.12.2025).
- [16] Daly D. Understanding and Improving Software Performance at MongoDB. *ICPE '23 Companion: Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*, Coimbra, Portugal, 15–19 April 2023. P. 307. DOI: <https://doi.org/10.1145/3578245.3584855>.
- [17] Amazon DynamoDB: Fast NoSQL Key-Value Database – Amazon DynamoDB. URL: <https://aws.amazon.com/dynamodb/> (дата звернення 10.12.2025).
- [18] Kotadiya U., Arora A. S., Yachamaneni T. Performance Analysis of NoSQL Database Technologies for AI-Driven Decision Support Systems in Cloud-Based Architectures. *International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology*. 2022. № 3(2). С. 60-69. DOI: <https://doi.org/10.63282/3050-922X.IJERET-V3I2P107>.
- [19] AWS Elastic Beanstalk. URL: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/overview-deployment-options/aws-elastic-beanstalk.html> (дата звернення: 10.12.2025).
- [20] Pahl C. Containerization and the PaaS Cloud. *IEEE Cloud Computing*. 2015. № 2(3). Pp. 24–31. doi: <https://doi.org/10.1109/MCC.2015.51>.
- [21] Containerization in Multi Cloud Environment Roles Strategies Challenges and Solutions for Effective Implementation / M. Waseem et al. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2025. Vol. 1. Pp. 1-59. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21439.32165>.
- [22] Rumpe B. Modellierung mit UML. Berlin: Springer, 2011. 288 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33933-7>.
- [23] Fowler M. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. 2-nd ed. Addison-Wesley Professional, 2003. 118 p.
- [24] Ambler S. W. The Object Primer: Agile Model-Driven Development with UML 2.0. 3 ed. Cambridge University Press, 2004. 572 p.
- [25] Худолій Ю. С., Косолапенко В. С. Особливості застосування чат-ботів на основі штучного інтелекту у фінансовій сфері. *Економіка і регіон*. 2023. № 3(90). С. 97–103. DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2023.3\(90\).3036](https://doi.org/10.26906/EiR.2023.3(90).3036).
- [26] Telegram Bot API. URL: <https://core.telegram.org/#api-methods> (дата звернення 10.12.2025).
- [27] Налаштування журналів CloudWatch за допомогою AWS Elastic Beanstalk. URL:

<https://docs.aws.amazon.com/elasticbeanstalk/latest/dg/AWSHowTo.cloudwatchlogs.html> (дата звернення 10.12.2025).

[28] FastAPI. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/#opinions> (дата звернення 10.12.2025).

[29] Robert C. Martin. Чиста архітектура. URL: <https://blog.cleancoder.com/uncle-bob/2012/08/13/the-clean-architecture.html> (дата звернення: 10.12.2025)

[30] Козуб Г. О., Козуб Ю. Г., Могильний Г. А., Жуков А. В. Розробка мобільного Android-додатку з застосуванням принципів Clean Architecture. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 5(269). С. 5-10. doi: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-5-10>.

ARCHITECTURAL AND ALGORITHMIC PROVISION OF SECURITY AND RELIABILITY FOR AN INTELLECTUAL SYSTEM OF CRYPTOCURRENCY RISK FORECASTING BASED ON AWS CLOUD PLATFORMS AND THE HTTPS PROTOCOL

Kryvenko O.V.	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 ;
Kaminsky B.V.	M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: b.kaminskyi99@gmail.com

This work is devoted to a comprehensive study of modern machine learning methods and their architectural and system support, necessary for creating a safe and reliable intelligent risk forecasting system in the field of cryptocurrency trading. The relevance of the work is determined by the high volatility of cryptocurrency markets and the critical need for systems that not only provide high accuracy of forecasts, but also guarantee the integrity, reliability and availability of the processed data. The purpose of the work is to study architectural and algorithmic solutions aimed at ensuring the security and reliability of an intelligent cryptocurrency risk forecasting system developed on the basis of AWS cloud platforms and the secure HTTPS protocol. In the context of the work, three key algorithms capable of processing time series were investigated and experimentally compared: Gradient Boosting, Random Forest and LSTM (Long Short-Term Memory). These algorithms are key not only for predictive modeling, but also play an important role in the field of cybersecurity, as they can be adapted to detect anomalies and fraud in the market, preventing possible manipulation attempts. The developed intelligent system is implemented on a client-server architecture, which includes a Telegram chatbot (on the aiogram framework) and a web server (on FastAPI). The system architecture was specially designed taking into account modern requirements for information protection: confidentiality and network, API security and access control, identity and access management, high availability and fault tolerance (Reliability/Availability), application health control. The developed system demonstrates a high level of architectural and algorithmic security and reliability, which is critical for financial systems. The integration of AWS IAM, DynamoDB Global Tables and secure protocols, along with the high accuracy of the Gradient Boosting model, confirms the effectiveness of the chosen approach for managing cryptocurrency risks.

Keywords: artificial intelligence; machine learning; forecasting; API security; reliability; AWS architecture; IAM; DYNAMODB GLOBAL TABLES; HTTPS; confidentiality; integrity.

References

- [1] Cryptocurrency exchange in Ukraine [Online]. Available: <https://blog.whitebit.com/en/>. Accessed on: December 10, 2025.
- [2] Trade cryptocurrencies on the Cryptomus Exchange. [Online]. Available: <https://cryptomus.com/>. Accessed on: December 10, 2025.
- [3] What is a Volatility in Trading. [Online]. Available: <https://cryptomus.com/uk/blog/cryptocurrencies-volatility-what-is-it>. Accessed on: December 23, 2025.
- [4] What is Decentralized Finance (DeFi)? [Online]. Available: <https://www.kraken.com/uk-ua/learn/what-is-decentralized-finance-defi>. Accessed on: December 10, 2025.
- [5] V. Aliexsieienko, and O. Chubar, “Kryptovaliuty: ekonomichna sutnist, istoriia rozvytku ta rol na svi-tovomu finansovomu rynku” [“Cryptocurrencies: economic essence, development history and role in the global financial market”], *Naukovi perspektyvy – Scientific perspectives*, № 1(43), 2024. doi: **10.52058/2708-7530-2024-1(43)-340-358**. (Ukr.)
- [6] Y. Zou, T. Meng, P. Zhang, W. Zhang, and H. Li, “Focus on Blockchain: A Comprehensive Survey on Academic and Application,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 187182–187201, 2020. doi: **10.1109/ACCESS.2020.3030491**.
- [7] P. G. Pererva, and Y. S. Mekhovych, “Teoretyko-metodychna sutnist kryptovaliuty yak skladovoi ekonomichnoho potentsialu pidpriemstva” [“The

- theoretical and methodological essence of cryptocurrency as a component of the economic potential of the enterprise”], *Ekonomichnyi zhurnal Odeskoho politekhnichnoho universytetu – Economic journal Odessa polytechnic university*, № 2(32), pp. 86-97, 2025. **doi: 10.15276/EJ.02.2025.10.** (Ukr.)
- [8] N. Semenchuk, V. Melnychuk, M. Kalinichenko, “Vplyv kryptoshakhrastva na tsyfrovu ekonomiku: zrostannia vtrat ta rol kiberbezpeky u minimizatsii ryzykiv” [“The impact of crypto fraud on the digital economy: increase in losses and the role of cybersecurity in risk minimization”], *Innovatsiina ekonomika – Innovative economy*, № 1, pp. 42-50, 2025. **doi: 10.37332/2309-1533.2025.1.5.** (Ukr.)
- [9] J. N. Chukwunweike, A. Praise, O. Osamuyi, S. Akinsuyi, and O. Akinsuyi, “AI and Deep Cycle Prediction: Enhancing while Safeguarding Data Privacy and Information Integrity,” *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 5, no. 8, pp. 3199-3207, 2024. **doi: 10.55248/gengpi.5.0824.2403.**
- [10] V. V. Petryna, and A. V. Doroshenko, “Efektyvnist zastosuvannya metodiv klasyfikatsii dlia zadach intelektualnogo analizu velykykh danykh” [“System for intelligent analysis of big data and improvement of object classification methods”], *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 34, no. 5, pp. 119-128, 2024. **doi: 10.36930/40340516.** (Ukr.)
- [11] O. Novoseletskyi, and V. Honcharova, “Identyfikatsii potentsiinoho spozhyvacha produktsii rynku elektronnoi komertsii metodom hradiientnogo bustinhu” [“Identification of a potential consumer of e-commerce market products by gradient busting method”], *Naukovi zapysky Natsionalnogo universytetu «Ostrozka akademiia». Serii «Ekonomika» – Scientific Notes of Ostroh Academy National University, Economics Series*, № 23(51), pp. 118–123, 2021. **doi: 10.25264/2311-5149-2021-23(51)-118-123.** (Ukr.)
- [12] I. V. Zamrii, and M. L. Fedorenko, “Analiz vykorystannia alhorytmiv shuchnoho intelektu dlia hlybokoho analizu finansovykh danykh” [“Analysis of the use of artificial intelligence algorithms for deep analysis of financial data”], *Suchasnyi zakhyst informatsii – Modern Information Security*, № 3(59), pp. 55–62, 2024. **doi: 10.31673/2409-7292.2024.030005.** (Ukr.)
- [13] J. VanderPlas, *Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data*, 2nd Ed., Sebastopol, USA: O'Reilly Media, 2022.
- [14] W. S. Vincent, *Django for Professionals. Production websites with Python & Django*. Lean Publishing, 2020.
- [15] pyTelegramBotAPI / Python Package Index (PyPI). [Online]. Available: <https://pypi.org/project/pyTelegramBotAPI/>. Accessed on: December 10, 2025.
- [16] David Daly, “Understanding and Improving Software Performance at MongoDB,” in *Proc. of the ICPE '23 Companion: Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*, Coimbra, Portugal, April 15–19, 2023, p. 307. **doi: 10.1145/3578245.3584855.**
- [17] Amazon DynamoDB: Managed NoSQL Database. 2025. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/dynamodb/>. Accessed on: December 10, 2025.
- [18] U. Kotadiya, A. S. Arora, and T. Yachamaneni, “Performance Analysis of NoSQL Database Technologies for AI-Driven Decision Support Systems in Cloud-Based Architectures,” *International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 60-69, 2022. **doi: 10.63282/3050-922X.IJERET-V3I2P107.**
- [19] AWS Elastic Beanstalk. Amazon Web Services, 2025. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/overview-deployment-options/aws-elastic-beanstalk.html>. Accessed on: December 10, 2025.
- [20] C. Pahl, “Containerization and the PaaS Cloud,” *IEEE Cloud Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 24–31, 2015. **doi: 10.1109/MCC.2015.51.**
- [21] M. Waseem et al., “Dataset for the Paper: Containerization in Multi-Cloud Environment: Roles, Strategies, Challenges, and Solutions for Effective Implementation,” *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, vol. 1, no. 1, pp. 1-59, 2025. **doi: 10.13140/RG.2.2.21439.32165.**
- [22] B. Rumpe. *Modellierung mit UML*. Berlin: Springer, 2011. **doi: 10.1007/978-3-319-33933-7.**
- [23] M. Fowler, *UML: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*, 3rd Ed., Addison-Wesley Professional, 2003.
- [24] S. W. Ambler, *The Object Primer: Agile Model-Driven Development with UML 2.0*, 3rd Ed., Cambridge University Press, 2004.
- [25] Y. Khudolii, V. Kosolapenko, “Osoblyvosti zastosuvannya chat-botiv na osnovi shuchnoho intelektu u finansovii sferi” [“Specifics of the use of chatbots based on artificial intelligence in the financial sector”], *Ekonomika i rehion – Economics and region*, № 3(90), pp. 97–103, 2023. **doi: 10.26906/EiR.2023.3(90).3036.**
- [26] Telegram Bot API. 2025. [Online]. Available: <https://core.telegram.org/#api-methods>. Accessed on: December 10, 2025.
- [27] Configuring CloudWatch Logs with AWS Elastic Beanstalk. 2025. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/elasticbeanstalk/latest/dg/AWSHowTo.cloudwatchlogs.html>. Accessed on: December 10, 2025.
- [28] FastAPI. 2025. [Online]. Available: <https://fastapi.tiangolo.com/#opinions>. Accessed on: December 10, 2025.
- [29] Robert C. Martin. The Clean Architecture. 2025. [Online]. Available: <https://blog.cleancoder.com/uncle-bob/2012/08/13/the-clean-architecture.html>. Accessed on: December 10, 2025.

[30] N. O. Kozub, Yu. H. Kozub, H. A. Mohylnyi, and A. V. Zhukov, “Rozrobka mobilnoho Android-dodatku z zastosuvanniam pryntsyviv Clean Architecture” [“Clean Architecture mobile Android supplement with strained principles”], Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East

Ukrainian National University, № 5(269), pp. 5-10, 2021. doi: 10.33216/1998-7927-2021-269-5-5-10.

Стаття надійшла 10.12.2025

Стаття прийнята 07.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Кривенко О. В., Камінський Б. В. Архітектурно-алгоритмічне забезпечення безпеки та надійності інтелектуальної системи прогнозування криптовалютних ризиків на базі хмарних платформ AWS та протоколу HTTPS. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том. 1. С. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359782>.

РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ФОРМАЛЬНИЙ ОПИС СТЕКОВОЇ ВІРТУАЛЬНОЇ МАШИНИ ЯК ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМПІЛЯЦІЇ

Суслов В.М.

асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5439-8310>, e-mail: suslov_v_m@pstu.edu

У роботі наведено результати розробки та апробації об'єктно-орієнтованої моделі стекової віртуальної машини, призначеної для дослідження внутрішніх механізмів трансляції та виконання програмного коду. Програмний продукт реалізовано на мові Scala, що забезпечує високу надійність архітектури за рахунок використання принципів суворої типізації та об'єктної інкапсуляції компонентів системи. Ключовою технологічною особливістю розробки є створення формального опису мови асемблера за допомогою нотації EBNF, що дозволяє детально моделювати етапи лексичного та синтаксичного аналізу. В ході дослідження обґрунтовано багаторівневу архітектуру моделі, яка включає віртуальний процесор із циклом *fetch-decode-execute*, стек операндів та систему регістрів, серед яких критичне значення має регістр *Frame Pointer* для управління кадрами функцій. Функціонал моделі базується на наборі з 17 інструкцій варіативної довжини, що забезпечує підтримку складних обчислювальних операцій, логічних розгалужень та рекурсивних викликів. Реалізовано механізми трансформації низькорівневих команд у двійковий байт-код, що дозволяє наочно демонструвати процеси фізичного представлення даних у програмній пам'яті. Експериментальна верифікація системи на прикладі алгоритмів обчислення суми чисел та рекурсивних послідовностей підтвердила повну відповідність стану стеку та регістрів теоретичним принципам роботи стекових процесорів. Впровадження розробленої об'єктно-орієнтованої моделі у навчальний процес дозволило підвищити рівень розуміння технологій компіляції на 30%. Зафіксовано суттєве зростання здатності студентів до самостійної розробки мовних процесорів, оскільки запропонована модель успішно виконує роль проміжної ланки між абстрактною теорією та складними промисловими платформами, такими як JVM. Доведено, що поєднання формального опису граматик із прозорою реалізацією механізму *Stack Frame* є ефективним інструментом вивчення технологій компіляції, що дозволяє мінімізувати часові витрати на засвоєння низькорівневих аспектів програмування.

Ключові слова: об'єктно-орієнтована модель; стекова віртуальна машина; технології компіляції; асемблер; байт-код; EBNF-нотація; кадр стеку; *Frame Pointer*; Scala; формальний опис.

Постановка проблеми

У сучасній архітектурі комп'ютерних систем використання віртуальних машин (ВМ) як проміжного середовища виконання програмного коду стало домінуючим стандартом. Згідно з тенденціями розвитку кросплатформного програмного забезпечення, використання байт-коду в таких середовищах, як Java Virtual Machine (JVM) та .NET Common Language Runtime (CLR), забезпечує високий рівень абстракції від апаратних ресурсів та безпеку виконання. Однак, незважаючи на їхню ефективність, промислові ВМ характеризуються надмірною складністю внутрішньої архітектури та закритістю механізмів управління контекстом, що створює значне навантаження на процес підготовки фахівців у галузі системного програмування та розробки компіляторів.

Однією з ключових причин виникнення складнощів при вивченні дисциплін «Теорія програмування» та «Технології програмування» є відсутність прозорих та компактних інструментів для візуалізації роботи низькорівневих механізмів обробки даних. Традиційні підходи до навчання часто обмежуються або суто теоретичним описом формальних граматик, або використанням занадто складних специфікацій існуючих ВМ, де логіка роботи з рекурсією, кадрами стеку та вказівниками контексту (FP, SP) прихована за багаторівневими оптимізаціями. Це призводить до того, що розробники-початківці не отримують цілісного розуміння

процесу трансляції високорівневих конструкцій у машинні команди та принципів розподілу пам'яті в реальному часі.

Актуальним завданням є створення спеціалізованої програмної моделі стекової віртуальної машини та відповідного інструментарію (асемблера), які б не просто виконували програмний код, а слугували інструментарієм для верифікації алгоритмів трансляції. Така система має базуватися на формально описаній граматиці та надавати прозорий механізм управління кадрами функцій, забезпечуючи перехід від теоретичного опису синтаксичних конструкцій до їх практичної реалізації в ізолюваному середовищі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблема проектування системного програмного забезпечення та засобів трансляції за останні роки змістилася з розробки складних промислових архітектур у бік створення спеціалізованих навчальних середовищ, що забезпечують прозорість обчислювальних процесів. Аналіз сучасної літератури та фундаментальних праць дозволяє виділити три основні напрями досліджень у цій сфері.

По-перше, це методологія проектування мовних процесорів та архітектур ВМ. Фундаментальні засади побудови компіляторів, викладені у класичних працях Ахо та Ульмана [1], а також Купера та Торчона [2], визначають стандарти фазової трансляції, від лексичного

аналізу до генерації коду. Проте для практичної реалізації сучасних DSL-мов та кастомних VM особливої актуальності набувають патерни реалізації мов, запропоновані Т. Парром [3], які дозволяють гнучко проєктувати структури інтерпретаторів. Сучасні дослідження [4–6] та практичні методики [7] розвивають ці ідеї, адаптуючи їх під потреби прозорого навчання, де мінімалістичний дизайн VM стає ключовим чинником засвоєння матеріалу.

По-друге, це взаємодія програмного забезпечення з апаратною архітектурою та візуалізація виконання. Розуміння роботи VM неможливе без врахування принципів організації комп'ютерних систем. Праці Паттерсона та Хеннессі [8], а також Браянта та О'Галларона [9] формують базу для розуміння інтерфейсу між апаратним та програмним рівнями, зокрема механізмів управління пам'яттю та стеком. На цій основі базуються сучасні роботи з візуалізації байт-коду [10] та динамічної реалізації мов [11, 12]. Окремий акцент на віртуалізації пам'яті та симуляції архітектур (зокрема RISC-V) зроблено у дослідженнях [13, 14], де показано, що інтерактивна симуляція низькорівневих операцій є значно ефективнішою за статичне вивчення специфікацій.

По-третє, це аналіз та адаптація промислових стандартів (Java, Python) для навчальних цілей. Вивчення внутрішньої структури JVM та CPython залишається важливим еталоном. У роботах [15–17] проводиться аналіз механізмів виконання байт-коду в реальних PVM (Python Virtual Machine) та JVM. Попри їхню потужність, автори констатують, що промислова складність часто приховує фундаментальні алгоритми. Це підтверджується і в роботах, присвячених віртуальним симуляціям в інженерії [18–20], де спостерігається тенденція до використання спрощених моделей для верифікації складних концепцій.

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що попри наявність ґрунтовної теоретичної бази [1–3] та значної кількості сучасних засобів візуалізації [6, 10, 12], питання створення компактної стекової VM, яка б поєднувала формальний опис граматики (EBNF) з прозорою реалізацією механізму кадрів стеку для підтримки рекурсії, залишається відкритим. Виявлений розрив між фундаментальною теорією «драконячої книги» [1] та практичною складністю промислових VM обґрунтовує необхідність розробки авторської системи. Запропонований підхід дозволить реалізувати принципи, описані у [2, 3], у формі детермінованої моделі, придатної для глибокого аналізу процесів трансляції в межах дисциплін «Теорія програмування» та «Технології програмування».

формалізацію граматики та прозору імплементацію механізмів управління кадрами стеку забезпечували ефективне моделювання процесів низькорівневої трансляції, а також слугували верифікаційним інструментарієм у межах вивчення дисциплін «Теорія програмування» та «Технології програмування».

Виклад основного матеріалу

Процес розробки інструментарію для моделювання низькорівневих обчислень у межах даного дослідження було розподілено на три етапи: проєктування архітектури стекової VM, формалізація граматики мови асемблера та реалізація механізмів трансляції.

В основу розробленої VM покладено принцип стекової організації обчислень, що дозволяє мінімізувати кількість явних операндів у командах. На відміну від регістрових машин, де кожна інструкція потребує адресації конкретних комірок, стекова модель використовує неявну адресацію через вершину стеку.

Архітектура VM включає наступні ключові компоненти:

- Instruction Pointer (IP) – реєстр адресації поточної команди;
- Stack Pointer (SP) – вказівник на вершину стеку операндів;
- Frame Pointer (FP) – базовий реєстр кадру стеку, що критично важливо для підтримки рекурсії та локальних змінних;
- Data Stack – програмно виділена область пам'яті для зберігання контексту обчислень.

Процес функціонування VM реалізує класичний цикл управління: отримання інструкції, її декодування та виконання. На лістингу 1 представлено програмну реалізацію етапу виконання операції додавання (IAdd) на мові Scala, що демонструє взаємодію реєстрів SP та IP.

Лістинг 1. Алгоритмічна реалізація циклу виконання інструкції IAdd

```
case IAdd =>
  val op2 = stack(sp)           // отримання другого
  операанда                     операанда
  val op1 = stack(sp - 1)       // отримання першого
  операанда                     операанда
  stack(sp - 1) = op1 + op2     // запис результату
                                на місце першого операанда
  recExec(bytecode, stack, ip + 1, sp - 1, fp)
// перехід до наступного циклу
```

Для забезпечення детермінованості трансляції структуру мови асемблера було формалізовано за допомогою нотації EBNF (Extended Backus-Naur Form). Це дозволило чітко розмежувати декларації функцій та загальні команди управління.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження архітектурних принципів побудови стекових обчислювальних систем та розробка на їх основі компактної віртуальної машини й спеціалізованої мови асемблера, які б через

Лістинг 2. Формальна граматики мови у нотації EBNF

EBNF

```

ASM-COMMANDS ::= { FUNCTION-DECLARATION |
COMMON-COMMANDS }
FUNCTION-DECLARATION ::= func NAME (argc=INT,
locals=INT) : { COMMON-COMMANDS } end
COMMON-COMMANDS ::= opcode [INT-NUMBER | NAME]
";" | LABEL ":"

```

Система команд складається з 17 інструкцій, кожна з яких має унікальний опкод та варіативну довжину від 1 до 13 байтів залежно від кількості операндів. Важливою особливістю є реалізація команд ILoad та IStore, які використовують відносно зміщення від FP. Це дозволяє динамічно керувати локальними змінними всередині кадру функції, що є фундаментальною концепцією в дисципліні «Теорія програмування».

Процес перетворення високорівневих конструкцій у машинні команди реалізовано через конвеєр «Лексер – Парсер – Генератор».

Лексер виконує токенизацію вхідного потоку, перетворюючи текст програми на послідовність атомарних одиниць (наприклад, call main; → <Call>, <Id, main>).

Парсер здійснює синтаксичний аналіз та формує проміжне представлення у вигляді списку інструкцій.

Генератор байт-коду виконує фінальний прохід, під час якого здійснюється розрахунок адрес міток та формування двійкового файлу (рис. 1).

```

[14, 0, 0, 0, 14, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 1, 6, 0, 0, 0, 3, 16, 0,
1, 6, 0, 0, 0, 2, 16, 0, 0, 0, 2, 15, 0, 0, 0, 1, 15, 0, 0, 0, 2,
0, 0, 0, 59, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 13, 15, -1, -1, -1, -3, 6,
0, 10, 9, 0, 0, 106, 15, -1, -1, -1, -3, 15, -1, -1, -1, -3,
0, 1, 3, 14, 0, 0, 0, 59, 0, 0, 0, 1, +12 more]

```

Рис. 1 – Байт-код програми

Для підтвердження ефективності розробленої системи було проведено тестування на прикладі рекурсивного алгоритму обчислення суми чисел (Лістинг 3). Даний приклад демонструє складну взаємодію переходів (Jnz), арифметики та вкладених викликів функцій.

Лістинг 3. Приклад реалізації рекурсивного алгоритму на розробленій мові

```

func sum argc=1, locals=0:
  ild -3;      # завантаження аргументу n
  icl 0;       # константа для порівняння
  ieg;        # перевірка умови n == 0
  jnz lblEnd;  # умовний перехід
  ild -3;
  ild -3; icl 1; isub;
  call sum;    # рекурсивний виклик
  iadd;        # сумування результату
  ret;
lblEnd:
  icl 0; ret;
end

```

Аналіз згенерованого байт-коду (рис. 1) підтверджує повну відповідність структурі, описаній у специфікації. Використання даної моделі дозволяє наочно продемонструвати студентам механізм «розгортання» рекурсії у стеку та маніпуляції регістром FP для збереження контексту викликів.

Після етапу синтаксичного аналізу парсер формує внутрішнє представлення програми. На рисунку 2 відображено сформований список послідовних інструкцій, який є результатом обробки токенів та перевірки їх відповідності формальній граматиці. Ця структура дозволяє верифікувати логіку програми перед її фінальною трансляцією у бінарний формат.

```

> 0 = {Call@1170} Call(main)
> 1 = {Halt$@1171} Halt
> 2 = {Func@1172} Func(main,0,2)
> 3 = {IConstantLoad@1173} IConstantLoad(3)
> 4 = {IStore@1174} IStore(1)
> 5 = {IConstantLoad@1175} IConstantLoad(2)
> 6 = {IStore@1176} IStore(2)
> 7 = {ILoad@1177} ILoad(1)
> 8 = {ILoad@1178} ILoad(2)
> 9 = {IAdd$@1179} IAdd
> 10 = {Call@1180} Call(sum)
> 11 = {Ret$@1181} Ret
> 12 = {Func@1182} Func(sum,1,0)

```

Рис. 2 – Список інструкцій

Наступним кроком є робота генератора байт-коду, який розраховує адреси міток та початків функцій, формуючи кінцевий масив даних для виконання віртуальною машиною. На рисунку 3 представлено результат такої генерації для рекурсивної програми розрахунку суми чисел. Візуалізація демонструє десяткове представлення інструкцій та їх операндів, що дозволяє наочно простежити структуру сформованого байт-коду.

```

[14, 0, 0, 0, 14, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 1, 6, 0, 0, 0, 3, 16, 0, 0, 0, 1, 6, 0, 0, 0, 2,
16, 0, 0, 0, 2, 15, 0, 0, 0, 1, 15, 0, 0, 0, 2, 14, 0, 0, 0, 59, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0,
13, 15, -1, -1, -1, -3, 6, 0, 0, 0, 10, 9, 0, 0, 0, 106, 15, -1, -1, -1, -3, 15, -1, -1,
-1, -3, 0, 1, 3, 14, 0, 0, 0, 59, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 2, 13, 6, 0, 0, 0, 0, 13]

```

Рис. 3 – Програма для розрахунку суми чисел у вигляді байт-коду

Таким чином, розроблений інструментарій забезпечує перехід від абстрактного вивчення теорії до практичного розуміння архітектурних рішень, що лежать в основі промислових ВМ, таких як JVM чи CPython

Висновки

У ході дослідження розроблено цілісну архітектуру навчальної обчислювальної системи, що включає стекову віртуальну машину, спеціалізовану мову

асемблера та комплекс засобів трансляції. Використання об'єктно-орієнтованого підходу на базі мови Scala дозволило реалізувати детерміноване середовище виконання, яке забезпечує повну прозорість циклу fetch-decode-execute та дозволяє детально верифікувати стан системи на кожному циклі обчислень.

Встановлено, що застосування нотації EBNF для формального опису граматики мови асемблера є критичним чинником забезпечення надійності трансляції. Це дало змогу автоматизувати процеси лексичного та синтаксичного аналізу, гарантуючи однозначне перетворення високорівневих декларацій функцій у компактний байт-код. Експериментально підтверджено ефективність розробленого формату інструкцій, що варіюється від 1 до 13 байтів, як оптимального балансу між щільністю зберігання програм та швидкістю їх декодування віртуальним процесором.

Ключовим технічним результатом роботи стала успішна імплементація механізму управління кадрами стеку за допомогою регістра FP. Це дозволило розв'язати проблему ізоляції контекстів виконання, забезпечивши підтримку рекурсивних алгоритмів та коректну роботу з локальними змінними через відносне зміщення. Апробація системи на прикладі рекурсивного обчислення суми чисел продемонструвала безпомилкову роботу стекового механізму, що є фундаментальною перевагою перед спрощеними навчальними моделями, які не підтримують динамічне управління кадрами.

Доведено високу методичну цінність розробленого інструментарію для освітнього процесу в межах дисциплін «Теорія програмування» та «Технології програмування». Прозорість архітектури та можливість візуалізації внутрішніх процесів ВМ дозволяють студентам подолати технологічний бар'єр при переході від теоретичних основ формальних граматик до розуміння принципів функціонування складних промислових середовищ, таких як JVM чи CPython. Це сприяє формуванню глибоких компетенцій у галузі системного програмування та розробки мовних процесорів.

Подальший розвиток проєкту вбачається у розширенні системи команд для підтримки операцій із плаваючою комою та впровадженні високорівневих механізмів управління пам'яттю, зокрема реалізації базової моделі «купи» та автоматизованого збирання сміття. Такі вдосконалення дозволять трансформувати розроблену модель у повноцінну платформу для експериментальних досліджень у сфері кросплатформного виконання керованого коду.

Перелік використаних джерел

- [1] Compilers: Principles, Techniques, and Tools / Aho A. V., Lam M. S., Sethi R., Ullman J. D. 2nd ed. Boston : Pearson Education, 2007. 1009 p.
- [2] Cooper K. D., Torczon L. Engineering a Compiler. 3rd ed. Boston : Morgan Kaufmann, Elsevier, 2022. 848 p.
- [3] Parr T. Language Implementation Patterns: Create Your Own Domain-Specific and General Programming Languages. Dallas : Pragmatic Bookshelf, 2010. 274 p.
- [4] Dimitrov D., Penev I. Design of a training compiler for increasing the efficiency of language processors learning. *eLearning and Software for Education : The International Scientific Conference*, 3–14 May 2021. 2021. DOI: <https://doi.org/10.12753/2066-026x-21-077>.
- [5] Penev I., Dimitrov D. Design of a Virtual Machine for Training Compilers. *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, Varna, Bulgaria, 30 September 2021 - 02 October 2021. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icai52893.2021.9639831>.
- [6] Stamenković S., Jovanović N. A Web-Based Educational System for Teaching Compilers. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2024. Vol. 17. Pp. 143–156. DOI: <https://doi.org/10.1109/tlt.2023.3297626>.
- [7] Fukuda H., Leger P., Figueroa I. A Practical Methodology to Learn Computer Architecture, Assembly Language, and Operating System. *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Supported Education*, 2–4 May 2020. Vol. 1. Pp. 333–340. DOI: <https://doi.org/10.5220/0009319503330340>.
- [8] Patterson D. A., Hennessy J. L. Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface (MIPS Edition). 5th ed. San Francisco : Morgan Kaufmann, 2013. 800 p.
- [9] Bryant R. E., O'Hallaron D. R. Computer Systems: A Programmer's Perspective. 3rd ed. Boston : Pearson, 2016. 1120 p.
- [10] Herber T., Weninger M. Trace-Based Bytecode Interpreter Visualization for Compiler Construction Education. *2025 IEEE Working Conference on Software Visualization (VISOFT)*, Auckland, New Zealand, 07-08 September 2025. Pp. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/VISOFT67405.2025.00010>.
- [11] Steingartner W., Sívý I. Enhancing Semantics Learning: A Dynamic Environment for Abstract Language Implementation Education. *IPSI Transactions on Internet Research*. 2024. Vol. 20, no. 2. Pp. 97–106. DOI: <https://doi.org/10.58245/ipsi.tir.2402.10>.
- [12] Teixeira S., Ramalho J., Henriques P. EWVM, a Web Virtual Machine to Support Code Generation in Compiler Courses. *Open Access Series in Informatics*. 2022. Vol. 7. Pp. 7:1–7:9. DOI: <https://doi.org/10.4230/oasics.slate.2022.7>.
- [13] Virtualization and visualization of virtual memory system for effective teaching-learning / Bhat W., Rashid A., Wani F., Altaf F. *Computer Applications in Engineering Education*. 2019. Vol. 27. Pp. 1286–1294. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.22152>.
- [14] Krim N., Porquet-Lupine J. VRV: A Versatile RISC-V Simulator for Education. *Proceedings of the 56th ACM Technical Symposium on Computer Science*

Education, Pittsburgh, USA, 26 February 2025–1 March 2025. Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1145/3641555.3705240>.

- [15] Dobravec T. Selected tools for Java class and bytecode inspection in the educational environment. *Open Computer Science*. 2021. Vol. 11, no. 1. Pp. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0170>.
- [16] Dobravec T. Java Virtual Machine Educational Tools. *2019 IEEE 15th International Scientific Conference on Informatics*, Poprad, Slovakia, 20–22 November 2019. Pp. 383–388. DOI: <https://doi.org/10.1109/Informatics47936.2019.9119263>.
- [17] Koleshwar G. S. A Deep Dive into Python Execution: CPython Bytecode, PVM, and Online Platforms. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*. 2025.

Vol. 13, iss. I. Pp. 2116–2122. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.74374>.

- [18] Zheng P., Yang J., Lou J., Wang B. Design and application of virtual simulation teaching platform for intelligent manufacturing. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62072-5>.
- [19] Methodology of Implementing Virtual Reality in Education for Industry 4.0 / A. Paszkiewicz et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Article 5049. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13095049>.
- [20] A framework for virtual learning in industrial engineering education: development of a reconfigurable virtual learning factory application / W. Terkaj et al. *Virtual Reality*. 2024. Vol. 28, Article 148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01042-8>.

IMPLEMENTATION AND FORMAL DESCRIPTION OF A STACK-BASED VIRTUAL MACHINE AS AN OBJECT-ORIENTED MODEL FOR STUDYING COMPILATION TECHNOLOGIES

Suslov V.M.

assistant, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5439-8310>, e-mail: suslov_v_m@pstu.edu

The paper presents the results of the development and validation of an object-oriented model of a stack-based virtual machine (VM), designed to investigate the internal mechanisms of translation and execution of program code. The software product is implemented in the Scala language, ensuring high architectural reliability through the application of strict typing principles and object-oriented encapsulation of system components. A key technological feature of the development is the creation of a formal description of the assembly language using EBNF notation, which allows for a detailed modeling of the lexical and syntactic analysis stages. During the study, a multi-level architecture of the model was substantiated, which includes a virtual processor with a fetch-decode-execute cycle, an operand stack, and a register system, where the Frame Pointer (FP) register for stack frame management is of critical importance. The model's functionality is based on a set of 17 instructions of variable length, providing support for complex computational operations, logical branching, and recursive calls. Mechanisms for transforming low-level commands into binary bytecode have been implemented, enabling a clear demonstration of the physical representation of data in program memory. Experimental verification of the system using algorithms for calculating sums of numbers and recursive sequences confirmed the full compliance of the stack and register states with the theoretical principles of stack-based processors. The implementation of the developed object-oriented model into the educational process has increased the level of understanding of compilation technologies by 30%. A significant increase in students' ability to independently develop language processors was recorded, as the proposed model successfully serves as an intermediary link between abstract theory and complex industrial platforms such as the JVM. It is proven that combining formal grammar descriptions with a transparent implementation of the Stack Frame mechanism is an effective tool for studying compilation technologies, allowing for the minimization of time spent on mastering low-level programming aspects.

Keywords: object-oriented model; stack-based virtual machine; compilation technologies; assembler; bytecode; EBNF notation; stack frame; Frame Pointer; Scala; formal description.

References

- [1] A. V. Aho, M. S. Lam, R. Sethi, and J. D. Ullman, *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*, 2nd ed., Boston, MA, USA: Pearson Education, 2007.
- [2] K. D. Cooper, and L. Torczon, *Engineering a Compiler*, 3rd ed., Boston, MA, USA: Morgan Kaufmann, Elsevier, 2022.
- [3] T. Parr, *Language Implementation Patterns: Create Your Own Domain-Specific and General Programming Languages*. Dallas, TX, USA: Pragmatic Bookshelf, 2010.
- [4] D. Dimitrov, and I. Penev, “Design of a training compiler for increasing the efficiency of language processors learning,” in *Proc. of the Int. Sci. Conf. «eLearning and Software for Education»*, May 3–14, 2021. doi: 10.12753/2066-026x-21-077.
- [5] I. Penev, and D. Dimitrov, “Design of a Virtual Machine for Training Compilers,” in *Proc. of the 2021 Int. Conf. Automatics and Informatics (ICAI)*, Varna,

- Bulgaria, 30 September 2021 – 02 October 2021, pp. 1–4. doi: [10.1109/icai52893.2021.9639831](https://doi.org/10.1109/icai52893.2021.9639831).
- [6] S. Stamenković, and N. Jovanović, “A Web-Based Educational System for Teaching Compilers,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 17, pp. 143–156, 2024. doi: [10.1109/tlt.2023.3297626](https://doi.org/10.1109/tlt.2023.3297626).
- [7] H. Fukuda, P. Leger, and I. Figueroa, “A Practical Methodology to Learn Computer Architecture, Assembly Language, and Operating System,” in *Proc. of the 12th Int. Conf. on Computer Supported Education*, May 2–4, 2020, pp. 333–340, 2020. doi: [10.5220/0009319503330340](https://doi.org/10.5220/0009319503330340).
- [8] D. A. Patterson, and J. L. Hennessy, *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface (MIPS Edition)*, 5th ed., San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2013.
- [9] R. E. Bryant, and D. R. O'Hallaron, *Computer Systems: A Programmer's Perspective*, 3rd ed., Boston, MA, USA: Pearson, 2016.
- [10] T. Herber and M. Weninger, “Trace-Based Bytecode Interpreter Visualization for Compiler Construction Education,” in *Proc. of the 2025 IEEE Working Conference on Software Visualization (VISOFT)*, Auckland, New Zealand, September 07–08, 2025, pp. 13–24. doi: [10.1109/VISOFT67405.2025.00010](https://doi.org/10.1109/VISOFT67405.2025.00010).
- [11] W. Steingartner, and I. Sívý, “Enhancing Semantics Learning: A Dynamic Environment for Abstract Language Implementation Education,” *IPSI Transactions on Internet Research*, vol. 20, no. 2, pp. 97–106, 2024. doi: [10.58245/ipsi.tir.2402.10](https://doi.org/10.58245/ipsi.tir.2402.10).
- [12] S. Teixeira, J. Ramalho, and P. Henriques, “EWVM, a Web Virtual Machine to Support Code Generation in Compiler Courses,” *Open Access Series in Informatics*, vol. 7, pp. 7:1–7:9, 2022. doi: [10.4230/oasics.slate.2022.7](https://doi.org/10.4230/oasics.slate.2022.7).
- [13] W. Bhat, A. Rashid, F. Wani, and F. Altaf, “Virtualization and visualization of virtual memory system for effective teaching–learning,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 27, pp. 1286–1294, 2019. doi: [10.1002/cae.22152](https://doi.org/10.1002/cae.22152).
- [14] N. Krim, and J. Porquet-Lupine, “VRV: A Versatile RISC-V Simulator for Education,” in *Proc. of the 56th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, Pittsburgh, USA, 26 February 2025 – 1 March 2025. doi: [10.1145/3641555.3705240](https://doi.org/10.1145/3641555.3705240).
- [15] T. Dobravec, “Selected tools for Java class and bytecode inspection in the educational environment,” *Open Computer Science*, vol. 11, no. 1, pp. 43–50, 2021. doi: [10.1515/comp-2020-0170](https://doi.org/10.1515/comp-2020-0170).
- [16] T. Dobravec, “Java Virtual Machine Educational Tools,” in *Proc. of the 2019 IEEE 15th Int. Sci. Conf. on Informatics*, Poprad, Slovakia, November 20–22, 2019, pp. 383–388. doi: [10.1109/Informatics47936.2019.9119263](https://doi.org/10.1109/Informatics47936.2019.9119263).
- [17] G. S. Koleshwar, “A Deep Dive into Python Execution: CPython Bytecode, PVM, and Online Platforms,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 13, no. I, pp. 2116–2122, 2025. doi: [10.22214/ijraset.2025.74374](https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.74374).
- [18] P. Zheng, J. Yang, J. Lou, and B. Wang, “Design and application of virtual simulation teaching platform for intelligent manufacturing,” *Scientific Reports*, vol. 14, 2024. doi: [10.1038/s41598-024-62072-5](https://doi.org/10.1038/s41598-024-62072-5).
- [19] A. Paszkiewicz, M. Salach, P. Dymora, M. Bolanowski, G. Budzik, and P. Kubiak, “Methodology of Implementing Virtual Reality in Education for Industry 4.0,” *Sustainability*, vol. 13, article 5049, 2021. doi: [10.3390/su13095049](https://doi.org/10.3390/su13095049).
- [20] W. Terkaj, M. Urgo, P. Kovács, E. Tóth, and M. Mondellini, “A framework for virtual learning in industrial engineering education: development of a reconfigurable virtual learning factory application,” *Virtual Reality*, vol. 28, 2024. doi: [10.1007/s10055-024-01042-8](https://doi.org/10.1007/s10055-024-01042-8).
- Стаття надійшла 15.01.2026
Стаття прийнята 11.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Суслов В. М. Реалізація та формальний опис стекової віртуальної машини як об'єктно-орієнтованої моделі для вивчення технологій компіляції. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 103–108. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359785>.

ПІДХОДИ ТА МЕТОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
БАЗАМИ ДАНИХ У СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

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

У статті розглянуто методи підвищення продуктивності систем управління базами даних в умовах зростання обсягів даних і навантаження. Показано, що ефективність СКБД визначається архітектурою системи, структурою даних, способами доступу до них, а також ефективністю обробки запитів і транзакцій. Проаналізовано основні підходи до оптимізації, зокрема індексування, партиціонування, шардинг, кешування та реплікацію. Розглянуто вплив нормалізації та денормалізації на швидкодію системи; вибір підходу залежить від типу навантаження. Підкреслено, що продумане проектування схеми бази даних дозволяє зменшити обсяг обробки та скоротити час виконання запитів. Окрему увагу приділено оптимізації SQL-запитів і аналізу планів їх виконання. Використання індексів (В-дерев, хеш- та повнотекстових) пришвидшує доступ до даних, але потребує врахування витрат під час запису. Зазначено роль матеріалізованих уявлень у прискоренні аналітичних запитів. Розглянуто вертикальне і горизонтальне масштабування та балансування навантаження як засобів ефективного використання ресурсів. Кешування зменшує навантаження на базу даних і прискорює доступ до часто використовуваних даних, за умови правильної стратегії оновлення. Реплікація підвищує доступність системи та дозволяє масштабувати читання; актуальною залишається проблема затримок у розподілених середовищах. Показано, що вибір між реляційними та нереляційними СКБД залежить від вимог до узгодженості, масштабованості та гнучкості, що обґрунтовує використання поліглотного підходу. Окремо відзначено застосування методів машинного навчання для автоматизації оптимізації. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності інформаційних систем.

Ключові слова: продуктивність СКБД; оптимізація запитів; індексування; шардинг; реплікація; кешування; масштабування; розподілені системи; NoSQL; машинне навчання.

Постановка проблеми

У сучасній цифровій економіці дані стали одним із ключових ресурсів, а їх обсяг постійно зростає. Це призводить до підвищених вимог до ефективності систем керування базами даних (СКБД), які забезпечують зберігання, обробку та доступ до інформації. Швидкість бізнес-процесів, стабільність інформаційних систем та рівень задоволеності користувачів безпосередньо залежать від продуктивності СКБД.

Проблема підвищення продуктивності СКБД полягає в необхідності забезпечення швидкої обробки запитів та транзакцій в умовах зростаючого навантаження та обмежених ресурсів. Продуктивність у цьому контексті розглядається як здатність системи мінімізувати час відгуку та ефективно обробляти значну кількість операцій. Водночас вона залежить від сукупності факторів: архітектури системи, характеристик апаратного забезпечення, структури даних, методів доступу до них та ефективності реалізації механізмів обробки запитів.

Ключовими аспектами проблеми є оптимізація структури бази даних, використання індексів, методів секціонування, шардування, кешування та реплікації, а також оптимізація SQL-запитів та проектування схем даних. Додаткову складність створює необхідність постійного моніторингу стану системи, виявлення вузких місць та адаптації до змін навантаження. Для цього використовуються як вбудовані засоби СКБД, так і зовнішні засоби аналізу та візуалізації.

Незважаючи на наявність значної кількості підходів та інструментів оптимізації, питання їх ефективного поєднання з урахуванням конкретних умов використання залишається відкритим. Це визначає актуальність досліджень, спрямованих на аналіз методів підвищення продуктивності СКБД та оцінку їх практичної доцільності.

Таким чином, основними завданнями є виявлення факторів, які найбільше впливають на продуктивність СКБД, аналіз існуючих методів оптимізації та обґрунтування підходів до їх комплексного застосування. Вирішення цих завдань є важливим як для розробки теоретичних підходів до управління даними, так і для підвищення ефективності сучасних інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За останнє десятиліття дослідження методів оптимізації продуктивності систем керування базами даних суттєво змістили фокус від класичних евристичних підходів до інтелектуальних, адаптивних і апаратно-орієнтованих рішень. Сучасні публікації відображають зміщення уваги з ізольованої оптимізації окремих компонентів СКБД до комплексного підходу, що охоплює всі рівні системи, від фізичного зберігання до планування виконання запитів і управління ресурсами.

Сучасні підходи до підвищення продуктивності СКБД орієнтовані на інтеграцію інтелектуальних методів, розподілених архітектур та ефективного використання апаратних ресурсів, див табл. 1.

Таблиця 1

Сучасні тенденції підвищення продуктивності СУБД

Напрямок	Суть підходу	Переваги	Недоліки	Джерела
Інтелектуальна оптимізація запитів (AI/ML)	Використання ML-моделей для побудови планів виконання та оцінки вартості запитів	Вища точність, автоматизація	Потреба в даних, складність впровадження	[4–8]
Автономні СУБД	Самоналаштування параметрів, індексів, планів виконання	Зменшення ручного адміністрування	Недостатня зрілість технологій	[9], [10]
Прогнозний моніторинг	Аналіз і прогноз навантаження та вузьких місць	Проактивна оптимізація	Складність моделей	[1–3]
Cloud-native архітектури	Розділення обчислень і зберігання, масштабування у хмарі	Висока гнучкість і відмовостійкість	Залежність від мережі	[11], [12]
Оптимізація пам'яті та кешу	Використання in-memory, кешування, memory-aware алгоритмів	Значне прискорення доступу	Вартість пам'яті	[13], [14], [19]
Оптимізація транзакцій	MVCC, lock-free структури, детерміновані СУБД	Підвищення паралелізму	Складність реалізації	[15], [16]
Розподілені системи та консенсус	Використання Raft, Paxos для узгодженості	Масштабованість і надійність	Затримки, складність	[21], [22]
Апаратно-орієнтована оптимізація	Використання CPU cache, NUMA, GPU	Висока продуктивність	Залежність від архітектури	[17], [18]
Денормалізація та адаптивні моделі даних	Баланс між узгодженістю та швидкістю	Прискорення аналітики	Надмірність даних	[20]

Раніше домінували дослідження, спрямовані на вдосконалення класичних cost-based оптимізаторів запитів, однак із часом стало очевидно, що традиційні моделі оцінки вартості не здатні адекватно працювати в умовах складних і динамічних навантажень. Це призвело до активного розвитку підходів із використанням Machine Learning, зокрема learned cost models та learned query optimization. У роботах [4–6] показано, що моделі машинного навчання можуть значно точніше прогнозувати вартість виконання запитів порівняно з традиційними методами. Оптимізатори, що навчаються, досягають прискорення в 1,5–3 рази по геометричному середньому на стандартних тестових завданнях, одночасно знижуючи помилки оцінки кардинальності на порядок. Однак залишаються проблеми в узагальненні, інтерпретованості, вимогах до навчальних даних та розгортанні у виробничому середовищі. Значна кількість досліджень також спрямована на пошук більш ефективних методів оптимізації планів виконання запитів. Гібридні архітектури, що поєднують традиційні та навчені компоненти, пропонують найбільш перспективний шлях до впровадження у виробництво [7, 8]. Паралельно розвивається концепція автономних баз даних, популяризована Michael Stonebraker, яка передбачає автоматичне налаштування індексів, параметрів і стратегій виконання без втручання адміністратора [9, 10].

Розвиток розподілених систем і хмарних технологій істотно вплинув на підходи до оптимізації продуктивності. У контексті cloud-native СКБД, які розгортаються на платформах на кшталт Amazon Web Services, Google Cloud і Microsoft Azure, дослідження фокусуються на розділенні обчислювальних ресурсів і зберігання, а також на оптимізації мережових взаємодій. У роботах [11, 12] для Amazon Aurora та інших сучасних систем показано, що така архітектура дозволяє досягти високої масштабованості та відмовостійкості, але

потребує нових методів оптимізації доступу до даних і кешування. Проблемам кешування присвячені роботи [13, 14].

Окремий значний напрям становлять дослідження конкурентності та транзакцій [15, 16]. Протягом останніх 10 років активно вдосконалювалися методи Multiversion Concurrency Control, що дозволяють зменшити блокування і підвищити паралелізм. Паралельно розвиваються детерміновані СКБД, такі як Calvin, де порядок виконання транзакцій визначається наперед, що знижує витрати на синхронізацію. Також досліджуються lock-free та wait-free структури даних, які дозволяють ефективно працювати на багатоядерних системах.

У розподілених СКБД значна увага приділяється оптимізації розміщення даних і виконання запитів з урахуванням locality. Протягом десятиліття було вдосконалено алгоритми обробки розподілених запитів, а також протоколи узгодження, зокрема Raft Consensus Algorithm і Paxos Algorithm, які залишаються основою для забезпечення узгодженості в кластерах. Дослідження спрямовані на зменшення затримок, використання батчінгу та адаптивне керування реплікацією.

Ще одним важливим трендом є врахування особливостей апаратного забезпечення. Сучасні дослідження показують, що продуктивність СКБД значною мірою залежить від ефективного використання CPU кешів, NUMA-архітектур і навіть GPU. У роботах [17, 18] доведено, що апаратно-орієнтована оптимізація може забезпечити кратне зростання продуктивності, особливо для аналітичних навантажень. In-memory бази даних стали стандартом для високопродуктивних систем, мінімізуючи залежність від дискових операцій [19].

Таким чином, аналіз та систематизація методів оптимізації продуктивності СКБД є актуальним,

оскільки наявність великої кількості різномірних підходів і технологій зумовлює необхідність їх систематизації та порівняльного аналізу.

Мета статті

Метою роботи є систематизація сучасних підходів та методів підвищення продуктивності СКБД, аналіз їх ефективності, а також пошук ключових напрямів подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу

Важливим аспектом аналізу є розуміння природи робочого навантаження на базу даних (read-heavy, write-heavy, mixed), характеру запитів (OLTP, OLAP) та прогнозування майбутнього зростання. Це дозволяє вибрати найбільш відповідні стратегії оптимізації та масштабування бази даних.

Продуктивність систем управління базами даних формується під впливом сукупності апаратних, архітектурних та програмних факторів. Їх урахування є необхідною умовою для забезпечення ефективної обробки даних і стабільної роботи інформаційних систем. У табл. 2 приведені головні фактори, що впливають на продуктивність СКБД.

Архітектура бази даних є фундаментом її продуктивності. Правильне проектування, денормалізація, шардинг та вибір відповідної моделі даних можуть кардинально покращити ефективність роботи СКБД. Одним із основних принципів проектування баз даних для досягнення високої продуктивності є ретельне планування структури даних з урахуванням конкретних завдань та навантажень. Це включає визначення оптимальної кількості таблиць і їх взаємозв'язків, а також вибір відповідних типів даних для кожного стовпця (наприклад, INT замість BIGINT, якщо діапазон значень

дозволяє; TIMESTAMP WITH TIME ZONE vs TIMESTAMP). Такий підхід дозволяє мінімізувати надмірність даних та прискорити виконання запитів.

Нормалізація даних є важливим етапом проектування, спрямованим на усунення надмірності, запобігання аномаліям даних та спрощення структури бази даних. Нормалізація включає поділ великих таблиць на менші та встановлення зв'язків між ними для підтримки цілісності даних. Хоча нормалізація сприяє підвищенню логічної узгодженості даних, у деяких випадках сильна нормалізація може призвести до збільшення складності запитів (більше JOIN операцій), що негативно впливає на продуктивність читання.

Денормалізація даних – це процес додавання надмірності до бази даних для прискорення читання даних за рахунок скорочення кількості необхідних операцій з'єднання таблиць. Денормалізацію слід застосовувати з обережністю, коли продуктивність читання критична, а операції запису менш інтенсивні. Дослідження показують, що виборча денормалізація може значно скоротити час виконання запитів у OLAP-системах та сховищах даних [20].

Підвищення продуктивності СКБД досягається шляхом застосування різноманітних методів, які охоплюють як логічний рівень організації даних, так і фізичні механізми їх обробки та зберігання. У табл. 3 наведено основні методи оптимізації продуктивності СКБД.

Шардинг (Sharding) та поділ даних (Partitioning) використовуються для горизонтального масштабування та розподілу великих обсягів даних. Поділ даних дозволяє розподілити дані за різними таблицями або базами даних на основі певних критеріїв, наприклад, за часом або географічною ознакою, що полегшує керування даними та підвищує продуктивність за рахунок паралельної обробки запитів.

Таблиця 2

Фактори, що впливають на продуктивність СУБД

Тип факторів	Складові	Вплив
Апаратні ресурси	CPU, RAM, дискова підсистема, мережа	Визначають базову швидкість обробки даних
Архітектура СУБД	Тип СУБД, розподіленість, модель даних	Впливає на масштабованість і ефективність
Структура даних	Схема БД, нормалізація/денормалізація	Зменшує надмірність і складність запитів
Обробка запитів	SQL-запити, плани виконання	Визначає час виконання операцій
Методи оптимізації	Індекси, кешування, реплікація, шардинг	Зменшують затримки та навантаження

Таблиця 3

Методи оптимізації продуктивності

Метод	Вміст	Переваги	Недоліки
Індексування	Створення структур для швидкого пошуку	Швидкий доступ	Уповільнення запису
Партиціонування	Розподіл даних на частини	Прискорення запитів	Складність управління
Шардинг	Розподіл по серверах	Масштабованість	Складність транзакцій
Кешування	Збереження часто використовуваних даних	Зменшення затримок	Потреба інвалідації
Реплікація	Копіювання даних	Висока доступність	Затримки синхронізації

Поділ може базуватися на діапазоні значень (Range Partitioning), хеш-функції (Hash Partitioning) або списках значень (List Partitioning). Це дозволяє оптимізувати запити, звертаючись лише до релевантних розділів (partition pruning), а також полегшує обслуговування (наприклад, видалення старих даних). PostgreSQL, Oracle, SQL Server надають потужні засоби для партиціонування.

Більш агресивний підхід полягає у розподілі даних між кількома серверами (шардами). Кожен шард містить підмножину даних, що дозволяє обробляти запити паралельно у різних вузлах, значно збільшуючи пропускну здатність і знижуючи навантаження на деякі машини.

Стратегії шардингу, або розподілу даних, включають кілька підходів, кожен з яких має свої особливості і області застосування.

Діапазонний шардинг (Range Sharding), при якому дані розподіляються по діапазонах ключів, дозволяє легко розділяти дані за певними інтервалами, що зручно для послідовних або часових даних. Однак, якщо один з діапазонів стає більш навантаженим, ніж інші, можуть виникати труднощі з балансуванням навантаження.

При хеш-шардингу (Hash Sharding) розподіл даних заснований на хеш-функції від ключа. Цей спосіб забезпечує рівномірний розподіл даних по шардам, що сприяє балансуванню навантаження та підвищенню масштабованості системи.

Метод, заснований на використанні директорії (Directory Based Sharding), передбачає наявність окремої таблиці або служби, яка зберігає інформацію про те, до якої кулі належить кожен запис і дозволяє швидко визначити розташування даних.

Незважаючи на переваги, шардинг стикається із низкою викликів. Насамперед ускладнюються виконання запитів, оскільки для отримання повної інформації може знадобитися звернутися до кількох шардів, що збільшує затримки та складність обробки. Також зростає складність управління системою, оскільки необхідно забезпечити правильне розподілення даних, балансування навантаження та моніторинг. Особливі труднощі виникають при реалізації розподілених транзакцій, оскільки необхідно зберігати цілісність даних та дотримуватись властивостей ACID (атомарність, узгодженість, ізоляція, довговічність). Для вирішення цих проблем сучасні системи використовують різні інструменти та рішення. Наприклад, Vitess для MySQL та Citus Data для PostgreSQL надають механізми для управління шардингом, автоматизації процесів та забезпечення надійності. В останні роки дослідники та розробники зосередилися на сучасних трендах, таких як автоматизація шардингу, динамічне управління шардовими сегментами та підвищення відмовостійкості систем, що дозволяє системам більш гнучко адаптуватися до змін навантаження та забезпечувати високий рівень доступності та надійності даних [21].

Ефективне індексування дозволяє СКБД швидше знаходити дані без необхідності сканувати всю таблицю, що значно скорочує час виконання запитів. Оптимізація SQL-запитів і використання планів виконання запитів також відіграють важливу роль у підвищенні ефективності роботи з даними. Стратегії індексування починаються з аналізу найчастіше використовуваних запитів та визначення ключових стовпців, за якими відбувається пошук. Створення індексів цих стовпців може значно прискорити виконання запитів.

Існує кілька основних типів індексів, кожен з яких призначений для певних завдань і має свої особливості. Одним з найбільш поширених є В-дерево, або збалансоване дерево, яке широко використовується в більшості систем управління базами даних завдяки своїй ефективності при пошуку діапазону, виконанні точних збігів і сортуванні даних. Такий індекс дозволяє швидко знаходити потрібні записи, підтримуючи баланс між висотою дерева та кількістю елементів, що забезпечує високу продуктивність під час роботи з великими обсягами даних. Наступним популярним типом є хеш-індекс, який підходить для швидкого пошуку точного збігу ключа, проте неефективний для пошуку по діапазону або сортування даних, оскільки не зберігає порядок елементів.

Для пошуку за текстовими даними призначений повнотекстовий індекс, який оптимізований для швидкого пошуку за вмістом текстових полів, що особливо важливо при роботі з великими масивами текстової інформації. У географічних системах або під час роботи з просторовими даними широко застосовуються просторові індекси, такі як R-дерево або GiST (Generalized Search Tree). Вони забезпечують ефективний пошук та обробку географічних об'єктів та просторових даних.

У PostgreSQL використовуються такі гнучкі типи індексів, як GiST та GIN (Generalized Inverted Index). GiST дозволяє індексувати складні типи даних, такі як масиви та JSONB, а також реалізовувати повнотекстовий пошук. GIN, у свою чергу, особливо ефективний для індексування структур даних, таких як масиви та повнотекстові пошукові системи, забезпечуючи швидкий доступ до окремих елементів усередині складних структур.

У дискових системах часто застосовують варіацію В-дерева, де всі дані зберігаються у листі, а внутрішні вузли служать для навігації. Такий підхід забезпечує швидкий доступ до даних та зручний для роботи з великими обсягами інформації, особливо за необхідності послідовного читання.

При виборі стовпців для індексування важливо враховувати, як часто вони беруть участь в умовах пошуку, з'єднаннях або сортуваннях, а також їх селективність, тобто унікальність значень в стовпці. Зазвичай рекомендується індексувати ті стовпці, які часто використовуються в умовах WHERE, JOIN ON або ORDER BY, особливо якщо вони мають високу селективність, тобто більшість значень у них унікальні або рідкісні.

Для підвищення ефективності запитів у випадках,

коли потрібна фільтрація кількома стовпцями, використовують складові (компонентні) індекси. Порядок стовпців у такому індексі має велике значення: зазвичай на початок ставляться найбільш селективні стовпці, щоб максимально знизити обсяг даних, що перевіряються при виконанні запитів.

Крім того, існують так звані індекси, що покривають (Covering Indexes), які містять всі стовпці, необхідні для виконання конкретного запиту. У такому разі система управління базою даних може отримати всі необхідні дані прямо з індексу, уникаючи звернення до таблиці, що значно прискорює виконання запитів і знижує навантаження на систему.

Кожен індекс збільшує накладні витрати при операціях запису (INSERT, UPDATE, DELETE), оскільки індекс також має бути оновлено. Надмірне індексування або те, що не використовується, може уповільнити запис і відібрати дисковий простір.

Навіть із хорошими індексами, неефективно написаний запит може працювати погано. Аналіз та оптимізація SQL-запитів потребують глибокого розуміння того, як запити впливають на продуктивність. Використання EXPLAIN або аналогічних команд у СКБД дозволяє розробникам бачити план виконання запиту та розуміти, які операції, наприклад, сканування таблиці чи індексу, виконуються для обробки. На основі цього аналізу можна модифікувати запити, щоб скоротити кількість даних, використовувати індексне сканування замість повного сканування таблиць або оптимізувати з'єднання таблиць. Використання планів виконання запитів не тільки допомагає в аналізі поточних запитів, а й у прогнозуванні поведінки бази даних при змінах структури даних або обсягу даних. Це дозволяє заздалегідь адаптувати стратегії індексування та оптимізувати запити для підтримки високої продуктивності системи.

Матеріалізовані уявлення також важливі для підвищення ефективності аналітичних систем і потребують акуратного управління. Їх застосування особливо актуальне під час роботи з великими обсягами даних та складними запитами. Матеріалізовані уявлення – це об'єкти бази даних, які зберігають попередньо обчислені результати запитів для прискорення доступу та зниження навантаження. На відміну від звичайних уявлень, що обчислюються при кожному зверненні, вони зберігають дані фізично та потребують механізму оновлення. Основні переваги використання включають швидке виконання аналітичних запитів та підтримку звітності, а недоліки – необхідність оновлення та додаткових ресурсів для зберігання.

Коли оптимізація на рівні запитів та індексів досягає своєї межі, у гру вступають стратегії масштабування, кешування та реплікації.

Кешування даних полягає у зберіганні копій даних, що часто використовуються, у більш швидкодоступній пам'яті, що дозволяє знизити кількість звернень до основного сховища даних і зменшити час відгуку на запити. Механізми кешування працюють на різних

рівнях архітектури програми, включаючи кешування на стороні клієнта, веб-сервера, програми та бази даних. Ефективність кешування залежить від правильного вибору даних для кешування, а також від алгоритмів керування кешем, таких як LRU (Least Recently Used) або FIFO (First In, First Out), які визначають які дані слід видалити з кешу при необхідності звільнити місце. Вплив кешування на продуктивність проявляється у зменшенні навантаження на базу даних та прискоренні доступу до даних. Кешування знижує кількість дискових операцій, необхідних для обробки запитів, зменшуючи час відгуку і збільшуючи пропускну здатність системи.

Стратегії кешування включають визначення оптимального розміру кешу, вибір відповідного розташування кешу (наприклад, на стороні клієнта чи сервера) та визначення життєвого циклу даних у кеші. Важливим аспектом є також інвалідність кешу, коли дані в основному сховищі змінюються, щоб запобігти наданню застарілих даних користувачам. Рішення для кешування даних можуть бути реалізовані на рівні апаратного забезпечення, наприклад з використанням розподілених кеш-систем, таких як Memcached або Redis, які надають високопродуктивні механізми для зберігання тимчасових даних в оперативній пам'яті. Ці системи дозволяють легко масштабувати кеш, розподіляючи його на кількох вузлах.

Впровадження стратегій кешування потребує ретельного планування та тестування, оскільки неправильно налаштований кеш може призвести до зниження продуктивності через часті операції інвалідності або неефективне використання ресурсів. Однак при правильному підході кешування стає потужним інструментом для оптимізації продуктивності, що дозволяє забезпечити швидкий доступ до даних та підвищити загальну ефективність роботи системи.

Реплікація (Replication) є процес створення копій даних на різних серверах для забезпечення надійності та ефективності роботи інформаційних систем. Її основне призначення включає забезпечення високої доступності (High Availability), що досягається автоматичним перемиканням на резервну копію (failover) у разі збою основного сервера, а також підвищення читальної масштабованості (Read Scalability) за рахунок перенаправлення запитів на читання до основного серверу, що знижує навантаження. Крім того, реплікація служить для резервного копіювання (Backup), дозволяючи створювати резервні копії з реплік та мінімізувати вплив на основний сервер. Використання реплікації для аналітичної обробки (Analytical Processing) дозволяє обробляти ресурсоємні аналітичні запити на окремих репліках, не погіршуючи продуктивність транзакційної обробки.

Існує кілька типів реплікації, кожен із яких відрізняється особливостями роботи. Синхронна реплікація передбачає, що дані записуються спочатку на основний сервер, а підтвердження запису відбувається лише після успішного запису на всі (або задану кількість)

реплік, що гарантує високу консистентність, але збільшує затримку запису. Асинхронна реплікація передбачає негайне підтвердження запису на основний сервер, а реплікація даних здійснюється у фоновому режимі, що підвищує продуктивність запису, але допускає можливу невелику втрату даних у разі збою основного сервера до завершення реплікації. Напівсинхронна реплікація є компромісним варіантом: підтвердження запису відбувається після її завершення на основному сервері та отримання підтвердження хоча б від однієї репліки, що забезпечує баланс між швидкістю та консистентністю. Сучасні дослідження в галузі розподілених систем зосереджені на розробці більш просунутих протоколів консенсусу, таких як Raft та Paxos, які забезпечують сувору консистентність при реплікації. Також велика увага приділяється зниженню затримок реплікації у географічно розподілених системах, що особливо важливо для глобальних додатків та сервісів [22].

Масштабуванням (Scaling) називають процес збільшення можливостей системи для обробки більшого обсягу даних та запитів. Існує два основних підходи до масштабування: вертикальне масштабування (Scaling Up) та горизонтальне масштабування (Scaling Out). Вертикальне масштабування передбачає збільшення потужності існуючого сервера через додавання ресурсів, як-от CPU, RAM чи швидших дисків. Цей метод простіше в реалізації і не вимагає зміни архітектури системи, однак він має апаратні обмеження і може бути досить дорогим, оскільки можливості збільшення ресурсів обмежено і рано чи пізно вичерпаються. У свою чергу, горизонтальне масштабування полягає в розширенні системи за рахунок додавання більшої кількості серверів, що забезпечує високу пропускну здатність та стійкість до відмов. Такий підхід більш гнучкий і економічний, особливо при роботі з великими обсягами даних, проте вимагає більш складної архітектури системи, наприклад, реалізації шардування і балансування навантаження, щоб ефективно розподіляти запити між безліччю серверів і уникати вузьких місць.

Балансування навантаження є процесом розподілу вхідних запитів до програми або бази даних між декількома обробниками (наприклад, серверами або процесами), щоб жоден з них не був перевантажений. Вона особливо актуальна у системах з реплікованими базами даних (наприклад, read replicas) або шардованими кластерами. Основне завдання балансування – запобігти перевантаженню окремих серверів та забезпечити стабільну роботу системи. Існує кілька методів балансування навантаження.

Метод Round Robin дозволяє послідовно розподіляти між серверами запити по черзі незалежно від поточного навантаження. Цей спосіб простий у реалізації, але не враховує реальні показники завантаженості серверів.

Метод Least Connections спрямований на те, щоб нові запити надсилалися на сервер із найменшою кількістю активних з'єднань, що сприяє більш

рівномірному розподілу навантаження.

Метод IP Hash використовує хеш-функцію від IP-адреси клієнта, що дозволяє забезпечити, щоб запити одного користувача завжди оброблялися одним сервером, що особливо важливо для збереження сеансів і даних користувача.

Географічне балансування розподіляє запити залежно від географічного положення користувача, що допомагає знизити затримки та підвищити швидкість відгуку.

Просунуті системи використовують динамічне балансування, яке в реальному часі аналізує поточне навантаження та параметри серверів, такі як час відгуку, завантаження процесора та доступна пам'ять, і на основі цих даних оптимально розподіляє вхідні запити, чим забезпечує максимальну ефективність роботи всієї системи.

Вибір моделі даних важливий етап при проектуванні системи зберігання інформації. Тип моделі даних істотно впливає на продуктивність системи, масштабованість і зручність управління. Існує два основних підходи до моделювання баз даних: реляційна модель (SQL) та нереляційна модель (NoSQL). Рішення на користь того чи іншого варіанта залежить від конкретних вимог проекту, особливостей даних та сценаріїв використання.

Реляційні системи управління базами даних, до яких належать такі популярні рішення, як PostgreSQL, MySQL, Oracle та SQL Server, характеризуються строгою структурою даних та підтримкою транзакційної цілісності, що базується на принципах ACID (атомарність, узгодженість, ізоляція, довговічність). Вони підходять для зберігання структурованих даних, де важливим є високий ступінь узгодженості та можливість виконання складних запитів з використанням операторів JOIN, агрегування та інших механізмів. У таких системах ключовими напрямками оптимізації є створення індексів для прискорення пошуку, проведення нормалізації чи денормалізації даних залежно від ситуації, і навіть партиціонування таблиць обробки великих обсягів інформації. Крім того, реляційні бази даних традиційно використовують вертикальне масштабування, тобто збільшення ресурсів одного сервера, що в певних випадках може обмежувати їх масштабованість.

Системи NoSQL охоплюють широкий спектр технологій, таких як MongoDB, Cassandra, Redis та Neo4j. Вони відрізняються гнучкістю схеми, що дозволяє динамічно змінювати структуру даних без необхідності складної міграції. Залежно від типу бази даних, їх переваги виявляються у різних сценаріях. Документоорієнтовані бази, наприклад MongoDB, добре працюють з неструктурованими або напівструктурованими даними, забезпечуючи швидкий доступ і масштабованість. Колонкові системи, такі як Cassandra, оптимізовані для обробки великих об'ємів даних та високої швидкості запису, поширюючи навантаження горизонтального масштабування. Ключ-значення бази, зокрема Redis, забезпечують надшвидкі операції читання

та запису в пам'яті, що актуально для кешування та обробки високонавантажених систем. Графові бази даних типу Neo4j спеціалізуються на моделюванні та аналізі складних взаємозв'язків між об'єктами. Оптимізація роботи з NoSQL системами залежить від їх типу. Для MongoDB важливим є правильний вибір структури документів та ефективне індексування, що дозволяє прискорити запити. У системах типу Cassandra необхідно грамотно спроектувати ключі шардування та кластеризації даних, щоб забезпечити рівномірний розподіл навантаження та мінімізувати затримки під час виконання запитів. Redis потребує оптимізації структури зберігання даних та налаштування пам'яті для підтримки високої швидкості операцій.

Основні відмінності в оптимізації продуктивності між NoSQL та реляційними СКБД полягають у наступному:

- Масштабованість. NoSQL бази даних краще підходять для горизонтального масштабування за рахунок шардингу та реплікації, що дозволяє обробляти великі обсяги даних та високі навантаження. Реляційні СКБД зазвичай орієнтовані на вертикальне масштабування, що може обмежувати їхню здатність до обробки дуже великих обсягів даних.

- Схема даних. Реляційні СКБД вимагають суворої схеми даних, що впливає на продуктивність при змінах структури даних. NoSQL бази забезпечують велику гнучкість в управлінні схемами, що дозволяє ефективніше адаптуватися до вимог додатків, що змінюються.

- Транзакції. Реляційні СКБД забезпечують сильну підтримку транзакцій з гарантіями ACID (атомарність, узгодженість, ізоляція, довговічність), що може впливати на продуктивність при високих навантаженнях. Багато NoSQL систем пропонують більш гнучкі моделі узгодженості (наприклад, BASE – Basically Available, Soft state, Eventual consistency), що дозволяє збільшити продуктивність за рахунок зменшення гарантій узгодженості.

- Оптимізація запитів. У реляційних СКБД існує складна оптимізація запитів з використанням планів виконання, індексів та статистики для покращення продуктивності. У NoSQL оптимізація часто залежить від специфіки моделі даних та типу бази даних (ключ-значення, документо-орієнтована, колонкова, графова), що потребує індивідуального підходу до кожної системи.

Вибір між NoSQL та реляційними СКБД для оптимізації продуктивності залежить від конкретних вимог додатку, обсягів даних, необхідності масштабування та специфіки робочих навантажень.

Сучасні програми часто використовують гібридні підходи, що поєднують у собі можливості реляційних і нереляційних баз даних. Такий підхід називається поліглотним зберіганням даних (polyglot persistence), він дозволяє застосовувати найбільш підходящу модель

для кожної конкретної задачі, наприклад, зберігати критично важливі структуровані дані в реляційній базі, а неструктуровані або швидкозростаючі дані в NoSQL системах. Такий підхід потребує грамотної інтеграції та управління кількома системами, що у свою чергу висуває додаткові вимоги до архітектури та забезпечення узгодженості даних.

Застосування машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI) в оптимізації систем управління базами даних стає все більш актуальним та перспективним напрямом розвитку. Ці технології дозволяють значно підвищити ефективність роботи СУБД за рахунок автоматизації складних процесів конфігурування, моніторингу та оптимізації, які раніше вимагали високого рівня експертизи та ручних зусиль. Зокрема, автоматичне індексування та налаштування параметрів системи за допомогою ML дозволяють системам самостійно аналізувати журнали запитів, виявляти шаблони використання та пропонувати або автоматично впроваджувати зміни у структурі індексів та конфігурації, що сприяє підвищенню швидкості виконання запитів та зниженню витрат ресурсів. Методи конфігурації, що навчаються на даних про продуктивність, допомагають адаптувати параметри системи до поточних умов роботи, забезпечуючи оптимальне функціонування без необхідності постійного ручного втручання.

Крім того, технології машинного навчання активно використовуються для прогнозування майбутнього навантаження та виявлення аномалій у роботі баз даних. ML-моделі здатні на основі історичних даних передбачати можливі вузькі місця та потенційні збої системи, що дозволяє заздалегідь вживати заходів щодо масштабування ресурсів або оптимізації системних налаштувань. Це значно скорочує час реакції на проблеми, що виникають, і підвищує стійкість IT-інфраструктури. Важливим напрямом є інтелектуальна оптимізація запитів. ML-рішення покращують традиційні методи планування виконання SQL-запитів, навчаючись на реальних даних про виконання операцій та передбачаючи їхню вартість з більшою точністю. Такі підходи дозволяють створювати ефективніші плани виконання, що особливо важливо для складних та розподілених систем, де оптимізація маршрутів передачі даних та розподіл обчислювальних завдань відіграють ключову роль.

Також широкого застосування знаходять системи інтелектуального управління ресурсами. Хмарні платформи використовують машинне навчання для автоматичного масштабування ресурсів, таких як CPU, пам'ять та дискова I/O, що дозволяє динамічно реагувати на зміни навантаження та забезпечувати необхідний рівень продуктивності. У розподілених та шардованих системах ML допомагає приймати рішення про найбільш раціональне розміщення даних, мінімізуючи затримки та підвищуючи пропускну спроможність системи.



Рис. 1 – Етапи оптимізації продуктивності СУБД

Оптимізація продуктивності СКБД є поетапним процесом, що охоплює аналіз, виявлення проблем, впровадження рішень і подальший контроль ефективності (дивись рис. 1).

Отже, підвищення продуктивності СКБД потребує комплексного підходу, що поєднує класичні методи оптимізації з новітніми інтелектуальними технологіями. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення інформаційних систем і підвищення ефективності управління даними в умовах зростаючих вимог до швидкодії та масштабованості.

Висновки

У роботі досліджено підходи до підвищення продуктивності систем управління базами даних в умовах зростання обсягів даних і навантаження. Показано, що ефективність СКБД визначається сукупністю факторів, зокрема архітектурою системи, якістю проектування схеми даних, рівнем оптимізації запитів і використанням апаратних ресурсів.

Порівняння реляційних і нереляційних СКБД свідчить, що вибір моделі даних залежить від специфіки задач. Реляційні системи доцільно застосовувати там, де критичною є узгодженість даних, тоді як NoSQL рішення краще підходять для систем із високими вимогами до масштабованості та гнучкості. У зв'язку з цим обґрунтовано використання поліглотного підходу, який дозволяє комбінувати різні типи СКБД.

Встановлено, що одним із ключових напрямів розвитку є застосування методів машинного навчання для автоматизації оптимізації. Такі підходи дають змогу адаптивно налаштовувати параметри системи, прогнозувати навантаження та виявляти вузькі місця.

Отже, підвищення продуктивності СКБД потребує комплексного підходу, що поєднує традиційні

методи оптимізації з сучасними інтелектуальними рішеннями. Отримані результати можуть бути використані при розробці та вдосконаленні інформаційних систем.

Перелік використаних джерел

- [1] Căuniac D. A., Niculae A. M. Monitoring and optimizing the database performance. *Proceedings of 22nd International Conference on Informatics in Economy (IE 2023)*, Bucharest, Romania, 25–26 May 2023. Singapore: Springer Nature, 2023. Pp. 39–49. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6529-8_4.
- [2] Ravi Kumar Y. V., Samayam A. K., Kadambari P. PostgreSQL monitoring using PgAdmin and Grafana. *Mastering PostgreSQL Administration: Internals, Operations, Monitoring, and Oracle Migration Strategies*. Berkeley: Apress, 2025. Pp. 405–484. DOI: https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1507-2_7.
- [3] Lingala B. Predictive monitoring for distributed and relational database management systems (RDBMS): A comprehensive analysis. *International Journal of Research and Applied Innovations*. 2025. Vol. 8, № 6. Pp. 13070–13082. DOI: <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i63s.13857>.
- [4] Marcus R., Papaemmanouil O. Towards a hands-free query optimizer through deep learning. *arXiv preprint. arXiv:1809.10212*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.10212>.
- [5] AI-augmented query optimization: A technical survey of foundations, systems, and open challenges / I. Khazrak et al. SSRN preprint. 2026. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6190260>.
- [6] A review of query optimization techniques: From traditional to reinforcement learning approaches / Shajeena S., Shiny R. M., Gayathri Devi K., Mary

- Vespa M. 2026 *International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, 11–13 February 2026. 2026. Pp. 1185–1189. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEARS67481.2026.11416629>.
- [7] Weng L., Liu D., Zhu W. та ін. Learned query optimizer in Alibaba MaxCompute: Challenges, analysis, and solutions. arXiv preprint. arXiv:2602.07336. 2026. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2602.07336>.
- [8] Sassi N., Jaziri W. Efficient AI-driven query optimization in large-scale databases: A reinforcement learning and graph-based approach. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, № 11. Article 1700. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13111700>.
- [9] Gabriska D., Pribilová K., Štřelec P. Artificial intelligence in modern database systems: Applications, tools, and challenges for autonomous data management. 2025 *International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, Stary Smokovec, Slovakia, 13–14 November 2025. 2025. Pp. 191–196. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETA67772.2025.11280054>.
- [10] Oloruntoba O. AI-Driven autonomous database management: Self-tuning, predictive query optimization, and intelligent indexing in enterprise it environments. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2025. Vol. 25, № 2. Pp. 1558–1580. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0534>.
- [11] Sirimalla A. Performance optimization in Oracle and SQL Server on AWS & Azure: A comprehensive framework for enterprise database management. *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Vol. 7, № 9. Pp. 150–160. DOI: <https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.9.19>.
- [12] Amazon Aurora: Design considerations for high throughput cloud-native relational databases / Verbitski A. et al. *Proceedings of the 2017 ACM SIGMOD International Conference*, Chicago, USA, 14–19 May 2017. Pp. 1041–1052. DOI: <https://doi.org/10.1145/3035918.3056101>.
- [13] Memory-aware query optimization / H. Dong et al. 2025 *IEEE International Conference on Big Data*, Macau, China, 08–11 December 2025. Pp. 7321–7329. DOI: <https://doi.org/10.1109/BigData66926.2025.11400969>.
- [14] HiEngine: How to architect a cloud-native memory-optimized database engine / Y. Ma et al. *Proceedings of the 2022 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, Philadelphia, USA, 12–17 June 2022. Pp. 2177–2190. DOI: <https://doi.org/10.1145/3514221.3526043>.
- [15] In-memory transaction processing: Efficiency and scalability considerations / H. Hu et al. *Knowledge and Information Systems*. 2019. Vol. 61. Pp. 1209–1240. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10115-019-01340-7>.
- [16] Li J., Michael E., Ports D. R. K. Eris: Coordination-free consistent transactions using in-network concurrency control. *Proceedings of the 26th Symposium on Operating Systems Principles*, Shanghai, China, 28 October 2017. Pp. 104–120. DOI: <https://doi.org/10.1145/3132747.3132751>.
- [17] Hardware-conscious stream processing: A survey / S. Zhang et al. *SIGMOD Record*. 2020. Vol. 48, № 4. Pp. 18–29. DOI: <https://doi.org/10.1145/3385658.3385662>.
- [18] Teubner J. Data processing on modern hardware. *SummerSchool '23: 4th ACM Europe Summer School on Science: Towards building the Data Science Stack*, Athens, Greece, 10–14 July 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3673199.3673204>.
- [19] Elastic use of far memory for in-memory database management systems / D. Lee et al. *Proceedings of the 19th International Workshop on Data Management on New Hardware*, Seattle, USA, 18–23 June 2023. Pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1145/3592980.3595311>.
- [20] Talakh M. V., Dvorzhak V. V., Ushenko Y. O. Denormalization techniques for IoT data warehouses: Balancing query performance and data redundancy. *Он-тико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2025. Том 49, № 1. Pp. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-49-1-72-81>.
- [21] Resilient and dependability management in distributed environments: A systematic review / Amiri Z., Heidari A., Navimipour N. J., Unal M. *Cluster Computing*. 2023. Vol. 26. Pp. 1565–1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03738-5>.
- [22] Georgakakos G., Verginadis Y. A novel data store supporting decentralized data management in the cloud computing continuum. *Advanced Information Networking and Applications (AINA 2025)*. Cham: Springer, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87778-0_40.

APPROACHES AND METHODS TO OPTIMIZING THE PRODUCTIVITY OF DATABASE MANAGEMENT SYSTEMS IN MODERN INFORMATION SYSTEMS

Vorotnikova Z.J. PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-5981>, e-mail: vorotnikova_z_j@pstu.edu

The article discusses methods for improving the performance of database management systems (DBMSs) in the face of growing data volumes and workloads typical of modern information systems. The effectiveness of a DBMS is directly related to the ability to quickly process queries, maintain low response times, and provide stable throughput. The performance of a DBMS is affected by many factors, including system architecture, hardware resources, data structure, access methods, and the efficiency of transaction and query processing. Key optimization approaches are analysed, such as database schema design, indexing, partitioning, sharding, as well as caching and replication. The impact of normalization and denormalisation on system performance is considered, and the choice depends on the characteristics of the workload and query types. Proper schema design helps reduce data processing overhead and query execution time. Special attention is paid to SQL query optimization and execution plan analysis as important tools for improving performance. The use of various types of indexes (B-trees, hash indexes, and full-text indexes) significantly speeds up data access, but introduces additional write overhead. Materialized representations are also considered as a way to speed up analytical queries. Scaling approaches, including vertical and horizontal scaling, as well as load balancing mechanisms, are analysed as means of efficient use of resources. Caching is highlighted as an effective method to reduce the load on the database and increase access speed, provided that appropriate update and invalidation strategies are used. Replication increases system availability and allows scaling of read operations, although reducing replication latency remains a challenge, especially in distributed environments. A comparison of relational and non-relational databases shows that the choice depends on the system requirements. Relational DBMSs provide high consistency, while NoSQL solutions offer better scalability and flexibility, supporting the use of a polyglot persistence approach. The application of machine learning methods for automated optimization is also being considered. Such systems can analyse workloads, identify bottlenecks, and automatically tune DBMS parameters, moving towards autonomous databases. The results can be used to improve the efficiency of information systems and data management under increasing workloads.

Keywords: DBMS performance; query optimization; indexing; sharding; replication; caching; scaling; distributed systems; NoSQL; machine learning.

References

- [1] D. A. Căuniac, and A. M. Niculae, "Monitoring and optimizing the database performance," in *Proc. of the Int. Conf. Informatics in Economy*, Bucharest, Romania, May 25–26, 2023, pp. 39–49. doi: **10.1007/978-981-99-6529-8_4**.
- [2] Y. V. Ravi Kumar, A. K. Samayam, and P. Kadambari, "PostgreSQL monitoring using PgAdmin and Grafana," *Mastering PostgreSQL Administration: Internals, Operations, Monitoring, and Oracle Migration Strategies*, pp. 405–484, 2025. doi: **10.1007/979-8-8688-1507-2_7**.
- [3] B. Lingala, "Predictive monitoring for distributed and relational database management systems (RDBMS): A comprehensive analysis," *International Journal of Research and Applied Innovations*, vol. 8, no. 6, pp. 13070–13082, 2025. doi: **10.52783/jisem.v10i63s.13857**.
- [4] R. Marcus, and O. Papaemmanouil, "Towards a hands-free query optimizer through deep learning," 2018, *arXiv:1809.10212*. doi: **10.48550/arXiv.1809.10212**.
- [5] I. Khazrak, N. Mashhadi Nejad, M. Homaei, M. Rezaee, and R. Green, "AI-augmented query optimization: A technical survey of foundations, systems, and open challenges," 2026, SSRN preprint. doi: **10.2139/ssrn.6190260**.
- [6] S. Shajeena, R. M. Shiny, Gayathri K. Devi, and M. Mary Vespa, "A review of query optimization techniques: From traditional to reinforcement learning approaches," in *Proc. of the 2026 Int. Conf. on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, February 11–13, 2026, pp. 1185–1189. doi: **10.1109/ICEARS67481.2026.11416629**.
- [7] L. Weng et al., "Learned query optimizer in Alibaba MaxCompute: Challenges, analysis, and solutions," 2026, *arXiv:2602.07336*. doi: **10.48550/arXiv.2602.07336**.
- [8] N. Sassi, and W. Jaziri, "Efficient AI-driven query optimization in large-scale databases: A reinforcement learning and graph-based approach," *Mathematics*, vol. 13, no. 11, article 1700, 2025, doi: **10.3390/math13111700**.
- [9] D. Gabriska, K. Pribilová, and P. Štělec, "Artificial intelligence in modern database systems: Applications, tools, and challenges for autonomous data management," in *Proc. of the 2025 Int. Conf. on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, Sary Smokovec, Slovakia, November 13–14, 2025, pp. 191–196. doi: **10.1109/ICETA67772.2025.11280054**.
- [10] O. Oloruntoba, "AI-based autonomous database management: Self-tuning, predictive query optimization and intelligent indexing in enterprise IT environments," *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 25, no. 2, pp. 1558–1580, 2025. doi: **10.30574/wjarr.2025.25.2.0534**.
- [11] A. Sirimalla, "Performance optimization in Oracle and SQL Server on AWS & Azure: A comprehensive framework for enterprise database management," *Journal of Computer Science and Technology Studies*, vol. 7, no. 9, pp. 150–160, 2025. doi: **10.32996/jcsts.2025.7.9.19**.
- [12] A. Verbitski et al., "Amazon Aurora: Design considerations for high throughput cloud-native relational databases," in *Proc. of the 2017 ACM SIGMOD*

- International Conf.*, Chicago, USA, May 14–19, 2017, pp. 1041–1052. doi: 10.1145/3035918.3056101.
- [13] H. Dong, Z. Hu, C. Lu, S. Weng, Q. Ruan, and R. Zhang, “Memory-aware query optimization,” in *2025 IEEE International Conference on Big Data*, Macau, China, December 08–11, 2025, pp. 7321–7329. doi: 10.1109/BigData66926.2025.11400969.
- [14] Y. Ma, S. Xie, H. Zhong, L. Lee, and K. Lv, “HiEngine: How to architect a cloud-native memory-optimized database engine,” in *Proceedings of the 2022 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, Philadelphia, USA, June 12–17, 2022, pp. 2177–2190. doi: 10.1145/3514221.3526043.
- [15] H. Hu, X. Zhou, T. Zhu, W. Qian, and A. Zhou, “In-memory transaction processing: Efficiency and scalability considerations,” *Knowledge and Information Systems*, vol. 61, pp. 1209–1240, 2019. doi: 10.1007/s10115-019-01340-7.
- [16] J. Li, E. Michael, and D. R. K. Ports, “Eris: Coordination-free consistent transactions using in-network concurrency control,” in *Proc. of the 26th Symposium on Operating Systems Principles*, Shanghai, China, October 28, 2017, pp. 104–120. doi: 10.1145/3132747.3132751.
- [17] S. Zhang, F. Zhang, Y. Wu, B. He, and P. Johns, “Hardware-conscious stream processing: A survey,” *SIGMOD Record*, vol. 48, no. 4, pp. 18–29, 2020. doi: 10.1145/3385658.3385662.
- [18] J. Teubner, “Data processing on modern hardware,” in *Proc. of the SummerSchool '23: 4th ACM Europe Summer School on Science: Towards building the Data Science Stack*, Athens, Greece, July 10–14, 2023. doi: 10.1145/3673199.3673204.
- [19] D. Lee et al., “Elastic use of far memory for in-memory database management systems,” in *Proc. of the 19th Int. Workshop on Data Management on New Hardware*, Seattle, USA, June 18–23, 2023, pp. 35–43. doi: 10.1145/3592980.3595311.
- [20] M. V. Talakh, V. V. Dvorzhak, and Y. O. Ushenko, “Denormalization techniques for IoT data warehouses: Balancing query performance and data redundancy,” *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii – Optoelectronic information–power technologies*, no. 1, pp. 72–81, 2025. doi: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-72-81.
- [21] Z. Amiri, A. Heidari, N. J. Navimipour, and M. Unal, “Resilient and dependability management in distributed environments: A systematic review,” *Cluster Computing*, vol. 26, pp. 1565–1600, 2023. doi: 10.1007/s10586-022-03738-5.
- [22] G. Georgakakos, and Y. Verginadis, “A novel data store supporting decentralized data management in the cloud computing continuum,” *Advanced Information Networking and Applications (AINA 2025)*, Cham: Springer, 2025. doi: 10.1007/978-3-031-87778-0_40.

Стаття надійшла 12.12.2025

Стаття прийнята 18.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Воротнікова З. Є. Підходи та методи до оптимізації продуктивності систем управління базами даних у сучасних інформаційних системах. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 1. С. 109–119. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359786>.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕМОНТНИХ РОБІТ: ІНТЕГРАЦІЯ
LiDAR ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Дегтярьова Л.М. канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5927-9550>, e-mail: degtyareva_l_m@pstu.edu

У статті розглядаються стратегічні пріоритети цифрової трансформації будівельного сектору України в умовах безпрецедентних викликів післявоєнного відновлення. Масштаби руйнувань вимагають переходу від традиційних ручних обстежень будівельних майданчиків до інтегрованих цифрових екосистем. Метою дослідження є розробка та обґрунтування високоефективної інтелектуальної системи для автоматизації архітектурних вимірювань та миттєвого створення документації з оцінки вартості шляхом конвергенції мобільного лідарного сканування та генеративного штучного інтелекту. Методологія дослідження зосереджена на багаторівневому технологічному стеку. На апаратному рівні дослідження використовує високоточні лідарні датчики, інтегровані в сучасні мобільні пристрої, використовуючи фреймворк Apple RoomPlan для полегшення збору просторових даних у режимі реального часу. На програмному рівні використовується кросплатформне середовище Flutter для забезпечення безперебійного потоку даних між геометричним модулем сканування та аналітичним ядром. Критичним компонентом методології є інтеграція великомовної моделі GPT-4o через API, яка виступає експертним інтерпретатором просторових даних. Результати дослідження демонструють принципово новий підхід до створення «цифрового двійника». Розроблений додаток дозволяє створювати високоточні 3D-моделі інтер'єрів з автоматичним семантичним маркуванням структурних компонентів, таких як стіни, отвори та архітектурні межі. Ключова інновація полягає у здатності системи обробляти запити користувача природною мовою (наприклад, «встановити плитку для підлоги та пофарбувати стіни») та співвідносити їх з точними геометричними параметрами, отриманими за допомогою лідарного сканування. Ця синергія дозволяє автономно розраховувати кількість матеріалів, витрати на оплату праці та технологічні процеси, створюючи структуровану оцінку вартості за лічені секунди. Наукова новизна роботи полягає у формалізації гібридної моделі обробки даних, де геометричні хмари точок перетворюються на практичні фінансово-технічні висновки без людських посередницьких розрахунків. Практичне значення отриманих результатів є глибоким: запропоноване рішення скорочує етап передпроектної документації до 95%, усуває суб'єктивні помилки у вимірюваннях та забезпечує прозору, перевірену основу для складання бюджету проектів реставрації. Такі системи є життєво важливим компонентом парадигми Індустрії 4.0, забезпечуючи конкурентоспроможність та прозорість національної будівельної галузі у світовому масштабі.

Ключові слова: цифровізація будівництва; LiDAR-сканування; штучний інтелект; GPT-4o; Flutter; RoomPlan; автоматизація кошторисів; BIM-моделювання.

Постановка проблеми

Матеріальне виробництво будь-якої країни світу тісно пов'язано з будівельною галуззю, яка є однією з ключових ланок економіки, впливаючи на соціально-економічні процеси, стимулюючи розвиток інфраструктури, машинобудування, енергетики тощо. Будівництво є наріжним каменем економіки, розбудовуючи інфраструктуру, впливаючи на промислове виробництво, використовуючи будівельні матеріали, долучаючи велику кількість людей, матеріалів та техніки, підвищуючи інвестиційну привабливість територій країни, добробут та якість життя людей, впливаючи на темпи інфляції та безробіття.

Масштабна реконструкція України після масштабних руйнувань, заподіяних агресором, потребує впровадження інноваційних технологій, що охоплюють повний життєвий цикл об'єктів нерухомості – від архітектурного проектування та зведення зруйнованих і пошкоджених об'єктів до інтелектуального управління та технічної експлуатації промислового, житлового й комерційного фондів.

Фундаментом стійкого розвитку будівельної галузі України, що забезпечує економію ресурсів, прискорення циклів будівництва та впровадження інноваційних джерел доходу на сьогоднішній день є цифровізація, яка впливає на відповідність українських стратегій глобальним цифровим трендам і гарантує підвищення якості об'єктів та конкурентоспроможність галузі на світовому рівні.

Можливості цифрової трансформації будівництва, підсилені аналітичним потенціалом штучного інтелекту, є критично важливими для галузі. Це дозволяє перейти від простої цифровізації до інтелектуального прогнозування життєвого циклу об'єктів, що має фундаментальне значення для сучасної науки та практики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналізуючи вплив питань цифровізації будівельного сектору, якому присвячено роботи багатьох закордонних та вітчизняних дослідників, наприклад, Serdar Durdyev, Amir Faraji, Abdul Hannan Qureshi, Oludolapo Ibrahim Olanrewaju, Lin Yang, Aliakbar Heidar, Мака-тьора Д. А., Обідник М. Д., Обідник М. В.,

Бондаренко Д.В. та ін. [1–11], які підіймають питання впливу інформаційних технологій на будівельну галузь, демонструють, що інтеграція BIM, інструментарія 3D-моделювання та методів штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процеси аналізу геометричних параметрів об'єктів, підвищити точність оцінювання та забезпечити підтримку прийняття рішень у будівництві.

Сучасна динаміка розвитку будівництва, активне зростання ролі цифрових технологій у будівництві та трансформація галузі під впливом сучасних викликів, особливо в українському контексті, вимагають розширення наукових досліджень у відповідному напрямі.

Мета статті

Мета статті полягає у демонстрації практичної реалізації удосконалення сенсорних систем у мобільних пристроях, що забезпечить можливість виконувати надточні обміри приміщень, створювати тривимірні цифрові копії об'єктів, а також автоматизувати розрахунки складних інженерних процесів. Нові можливості для підвищення якості та швидкості підготовки проектної документації виникають завдяки досягненням у галузі штучного інтелекту (ШІ) та впровадженню технології LiDAR у споживчу електроніку. Система повинна забезпечувати відгук інтерфейсу під час 3D-візуалізації не менше 30 FPS та виконувати генерацію кошторису протягом 5-10 секунд. Дані повинні зберігатися локально для можливості роботи в умовах обмеженого доступу до мережі Інтернет.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процес автоматизації збору та обробки просторових даних для потреб будівельної галузі.

Предметом дослідження є методи та алгоритми інтеграції LiDAR-сканування з великими мовними моделями для автоматичного формування кошторисної документації у кросплатформовому мобільному середовищі.

На основі проведеного аналізу існуючих рішень та виявленого «технологічного вакууму» у сфері автоматизації будівельних обмірів, було визначено необхідність створення інтелектуального мобільного застосунку. Основна проблема, яку вирішує дане дослідження – це усунення ручних розрахунків та суб'єктивності при складанні попередніх кошторисів на ремонтні роботи.

Виклад основного матеріалу

В останні роки спостерігається стрімкий розвиток технологій мобільного сканування та інтелектуальної обробки даних, що спричинило кардинальні зміни в архітектурній, будівельній та дизайнерській галузях. Удосконалення сенсорних систем у мобільних пристроях забезпечує можливість виконувати надточні

обміри приміщень, створювати тривимірні цифрові копії об'єктів, а також автоматизувати розрахунки складних інженерних процесів. Нові можливості для підвищення якості та швидкості підготовки проектної документації виникають завдяки досягненням у галузі штучного інтелекту (ШІ) та впровадженню технології LiDAR у споживчу електроніку.

У сучасному будівництві та дизайні інтер'єрів етап обміру приміщень та складання кошторису є фундаментальним компонентом реалізації будь-якого проекту. Точні дані про геометрію простору мають критичне значення для архітекторів, підрядників та замовників, оскільки вони безпосередньо впливають на обсяги закупівель матеріалів, терміни виконання робіт та фінансове планування.

Процес підготовки об'єкта до ремонту або реконструкції складається з кількох ключових етапів:

- виїзд на об'єкт та фізичний обмір приміщення;
- побудова двовимірних креслень (планів) або 3D-моделей;
- верифікація площ поверхонь, віконних та дверних прорізів;
- розрахунок необхідної кількості будівельних матеріалів;
- формування фінального кошторису з урахуванням ринкових цін.

Навіть при використанні сучасних лазерних далекомірів у процесі обмірів можуть траплятися помилки. Більшість із них пов'язана з людським фактором: некоректним записом даних, пропуском складних кутів або помилками при ручному перенесенні замірів у програмне забезпечення для розрахунків.

Через велику різноманітність архітектурних форм, наявність меблів, що перешкоджають замірам, а також складність розрахунку нелінійних елементів, використання класичних методів (ручного обміру) часто є неефективним та часозатратним. Традиційні підходи вимагають значної подальшої обробки даних у CAD-системах, що ускладнює отримання швидкого результату безпосередньо на об'єкті.

Саме тому доцільним є використання методів комп'ютерного зору та технології LiDAR у поєднанні з великими мовними моделями (LLM). Технологія LiDAR дозволяє отримувати «хмару точок» та автоматично розпізнавати площини стін, підлоги та стелі з точністю до сантиметра навіть у складних умовах. У свою чергу, інтеграція штучного інтелекту дозволяє системі не просто збирати дані, а інтелектуально аналізувати їх: автоматично вираховувати площу під оздоблення, підбирати типи робіт та генерувати деталізовані кошториси на основі текстових запитів користувача.

Впровадження системи автоматизованого обміру та AI-кошторису є важливим кроком для цифрової трансформації будівельної галузі. Така система дозволить мінімізувати кількість помилок у розрахунках, скоротити час від першого візиту на об'єкт до отримання

фінансового плану та забезпечити прозорість взаємодії між замовником і виконавцем.

Сучасний стан автоматизації у сфері архітектурних обмірів та складання кошторисів характеризується поступовим переходом від дискретних ручних операцій до комплексних цифрових екосистем, вершиною яких є BIM-моделювання (Building Information Modeling). Традиційно процес обміру тривалий час залишався консервативним: використання механічних або базових лазерних рулеток вимагало від спеціаліста самостійної фіксації кожної лінійної величини з подальшим ручним перенесенням даних у креслярські програми. На цьому етапі автоматизація обмежувалася лише точністю самого вимірювального приладу, тоді як інтелектуальна складова – побудова геометрії приміщення та розрахунок обсягів робіт – повністю залежала від людини.

З впровадженням технологій комп'ютерного зору та систем мобільного 3D-сканування (LiDAR) рівень автоматизації піднявся на якісно новий рівень, що дозволяє інтегрувати результати обмірів безпосередньо в об'єктно-орієнтовані моделі. Сучасні програмні рішення дозволяють не просто фіксувати відстані, а автоматично розпізнавати площини стін, підлоги, стелі, а також ідентифікувати віконні та дверні прорізи як інтелектуальні об'єкти. Це відповідає концепції BIM, де кожен елемент моделі містить не лише геометричні параметри, а й метадані про тип матеріалу, конструктивні особливості та об'єми.

Проте, попри високий рівень автоматизації збору даних для BIM-моделей, етап їхньої автоматичної вартісної інтерпретації все ще залишається фрагментарним. Більшість існуючих професійних систем (таких як Revit чи ArchiCAD) працюють як складні середовища, що вимагають від користувача ручного призначення параметрів для кожної поверхні та вибору технологічних процесів для формування кошторису. Автоматичне поєднання «цифрового двійника» приміщення та «логіки» розрахунку необхідних робіт на основі контексту приміщення є найменш автоматизованою ланкою. Таким чином, актуальним напрямком розвитку є створення систем, які здатні не лише «бачити» простір у форматі BIM, а й самостійно аналізувати його параметри для генерації фінансово-технічної документації без надмірного втручання інженерів.

Розгляд сучасних засобів автоматизації обмірів неможливий без аналізу фундаментального фреймворку RoomPlan від компанії Apple, який став революційним кроком у демократизації технології LiDAR для широкого кола користувачів. Згідно з технічною документацією на офіційному порталі Apple Developer [12], RoomPlan визначається як Swift API, що використовує машинне навчання та сенсорні дані для створення тривимірних планів приміщень у реальному часі.

Принцип роботи системи базується на синергії сканера LiDAR та камери пристрою. LiDAR випромінює тисячі лазерних імпульсів, які відбиваються від поверхонь, дозволяючи системі миттєво визначати

відстань до об'єктів з міліметровою точністю. Одночасно з цим алгоритми комп'ютерного зору аналізують відеопотік з камери для ідентифікації семантики об'єктів. Це означає, що система не просто бачить «перешкоду», а розуміє, що перед нею – несуча стіна, дверне полотно або віконна рама.

Процес взаємодії користувача з RoomPlan характеризується високим рівнем іммерсивності. Під час сканування на екрані пристрою поверх реального зображення кімнати накладаються напівпрозорі цифрові моделі. Це дає оператору миттєвий зворотний зв'язок: якщо система пропустила кут або невірно визначила межу стіни, це стає помітно одразу, що дозволяє повторно просканувати складну ділянку. Такий підхід радикально відрізняється від традиційних лазерних рулеток, де помилка виявляється лише на етапі побудови креслення в офісі.

З точки зору структури даних, RoomPlan генерує об'єктно-орієнтовану модель. На відміну від звичайної фотограмметрії, яка створює «порожню» 3D-сітку (mesh), RoomPlan видає параметричний опис приміщення. Кожен елемент моделі – це окремий об'єкт класу CapturedRoom, що має свої координати, розміри та атрибути. Наприклад, для стіни вказується не тільки довжина, а й товщина та орієнтація в просторі. Це дозволяє експортувати результати у форматі USDZ, який легко інтегрується в професійне архітектурне ПЗ, таке як Cinema 4D або Blender.

Проте, аналізуючи RoomPlan як інструмент для підготовки до ремонту, виявляються суттєві обмеження. Головне з них – відсутність будь-якої контекстної обробки матеріалів. Система бачить геометрію, але вона «сліпа» до типу поверхні: вона не розрізняє бетонну стіну від гіпсокартонної, а паркет від лінолеуму. Це робить неможливим автоматичний розрахунок вартості робіт без залучення додаткових інтелектуальних модулів. Крім того, RoomPlan обмежений лише екосистемою iOS, що відсікає значну частину ринку.

У контексті даного дослідження, досвід використання RoomPlan є надзвичайно цінним. В даному дослідженні було запозичено концепцію «цифрового двійника» (Digital Twin), де вихідним результатом сканування є структурований JSON-файл з усіма метриками. Це дозволило усунути головний недолік Apple-рішення: беремо «німу» геометрію та передаємо її в нейронну мережу, яка наповнює її інженерним змістом, перетворюючи розміри стін у перелік технологічних етапів оздоблення. Таким чином, RoomPlan слугує надійною сенсорною базою для майбутньої інтелектуальної надбудови.

В результаті зробленого аналізу можна зазначити, що LiDAR-режим дозволяє дуже швидко «захоплювати» великі площі, створюючи каркасну модель кімнати за лічені секунди. Режим фотограмметрії, своєю чергою, використовує сотні фотографій для генерації високоякісних текстур, що дозволяє зафіксувати колір стін, стан покриття підлоги та навіть дрібні деталі

інтер'єру. Це дозволить користувачеві візуально валидувати результат сканування перед тим, як система передасть дані до ІІІ-модуля для розрахунків. Таким чином, ми поєднаємо візуальну достовірність, притаманну Polyscan, із параметричною точністю RoomPlan та когнітивною аналітикою GPT-4o, імплементуючи спрощений аналог такого переглядача за допомогою бібліотек Flutter.

В результаті проведеного аналізу інструментів, що відповідають за три основні вектори роботи системи:

- інструменти інтеграції з апаратним забезпеченням: бібліотеки для передачі даних від LiDAR-сенсора та API RoomPlan у середовище Flutter;
- бібліотеки обробки даних та мережевої взаємодії: засоби для комунікації з серверами OpenAI та серіалізації складних JSON-структур кошторисів.
- інструменти управління інтерфейсом та станом (State Management): архітектурні рішення для забезпечення чуйності додатку під час інтенсивних обчислень.

Саме тому для детального розгляду у межах даного дослідження обрано наступні програмні засоби:

- flutter_roomplan (або методи MethodChannels): основний інструмент для виклику нативного інтерфейсу RoomPlan із коду на Dart та отримання результатів сканування;
- dart_openai: бібліотека для зручної інтеграції з моделями GPT-4o, що забезпечує потокову передачу відповідей (Streaming) для створення інтерактивного чату;
- model_viewer_plus: віджет для відображення отриманої 3D-моделі у форматі USDZ/GLB безпосередньо в інтерфейсі мобільного додатка;
- provider / flutter_bloc: бібліотеки для управління станом, що дозволяють синхронізувати дані між процесом сканування, аналізом ІІІ та фінальним кошторисом;
- path_provider та share_plus: інструменти для роботи з файловою системою пристрою (збереження звітів) та їх експорту у форматі PDF або Excel.

Інтерфейс розробленого додатку представлено на рис. 1.

У межах розробки системи, що базується на гібридному стеку технологій, центральне місце займає питання забезпечення безперервного зв'язку між кросплатформовим шаром інтерфейсу (Flutter) та нативним інструментарієм Apple для сканування простору. Основним інструментом для вирішення цієї задачі є бібліотека flutter_roomplan [13].

Ключовою інновацією проекту є поєднання Apple RoomPlan (LiDAR) [14] для збору прецизійних геометричних даних та Generative AI (OpenAI API) [15, 16] для їх логічної інтерпретації.

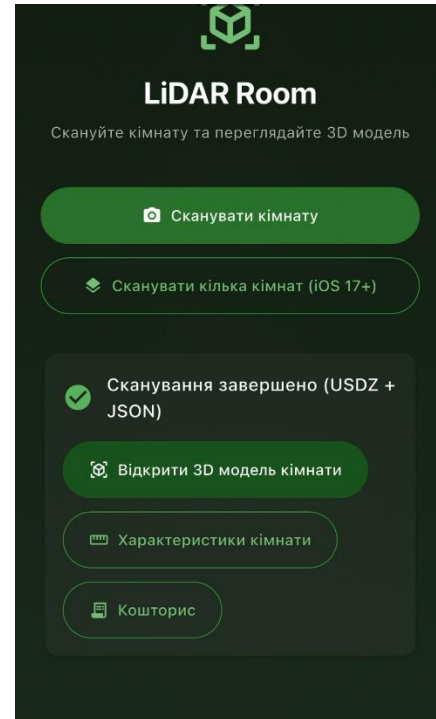


Рис. 1 – Інтерфейс програми для розрахунку автоматичного кошторису за допомогою ІІІ

Геометричний шар: Використання LiDAR дозволяє отримати точність обмірів до міліметрів, що недоступно для традиційних методів фотограмметрії.

Логічний шар: Замість ручного введення формул, система передає отримані параметри стін, підлоги та отворів до моделі gpt-4o-mini.

Як зазначається в дослідженнях щодо інтеграції LLM в інженерні процеси [17], використання моделей сімейства GPT дозволяє отримувати не просто арифметичний результат, а релевантний перелік технологічних процесів. Модель gpt-4o-mini обрана як оптимальний баланс між швидкістю відповіді та вартістю запитів, що дозволяє в реальному часі формувати специфікації матеріалів та актуальні ціни на роботи, враховуючи регіональні особливості та складність поверхонь.

Використовуючи апаратні можливості сенсора LiDAR для точного визначення геометрії простору в реальному часі додатком виконується автоматичне розпізнавання ключових архітектурних елементів: стін, вікон, дверей, а також базових об'єктів меблів, що впливають на площу оздоблення та відбувається створення цифрової хмари точок та її перетворення у структурований формат даних.

Після виконання сканування кімнати і отримання 3D-копії відсканованого приміщення (рис. 2), програма спроможна продемонструвати кімнату з будь якого ракурсу, зручного для перегляду та впевненості у точності сканування. При цьому користувачеві надаються інструменти для візуальної перевірки коректності обміру (обертання, масштабування, огляд з різних

ракурсів), а відображення накладеної сітки та маркерів об'єктів підтверджує точність розпізнавання меж приміщення.



Рис. 2 – Вигляд зображення кімнати, після LiDAR-сканування

Після відкриття 3D-моделі відсканованого приміщення, додаток надає інформацію про корисну площу робочої зони, в даному випадку – кімнати, з урахуванням площі підлоги, висоти приміщення, площі всіх стін, вікон та дверей тощо (рис. 3). Додаток виконує експорт цих даних у формат, придатний для подальшої математичної та логічної обробки.

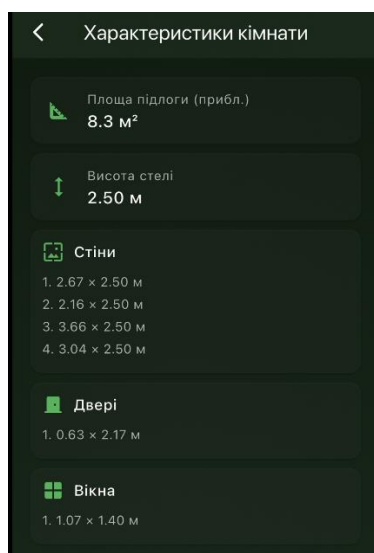


Рис. 3 – Результат заміру складових частин приміщення за допомогою LiDAR-сканування

З урахуванням опрацьованої інформації додаток надає можливість вказати необхідні будівельні та/або ремонтні роботи, які користувач вважає за потрібні і, залучивши можливості штучного інтелекту (рис. 4), розробити кошторис (рис. 5), використовуючи для цього відповідну команду головного меню (див. рис. 1)

Генерація автоматичного кошторису за допомогою ШІ інтерпретує текстовий запит користувача (наприклад, «покласти плитку на підлогу та пофарбувати стіни») у контексті отриманої геометрії. Використання можливостей моделі gpt-4o-mini для підбору переліку необхідних технологічних процесів, розрахунку кількості матеріалів та визначення орієнтовної вартості робіт дозволяє забезпечувати релевантність цін та технологій відповідно до сучасних стандартів будівництва.

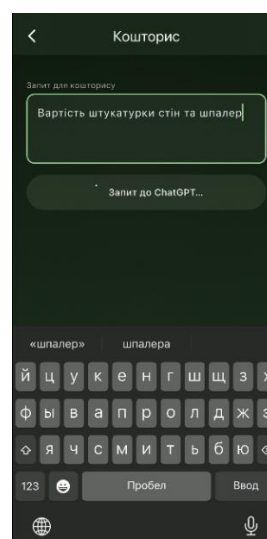


Рис. 4 – Вікно додатку для обрахунку робіт

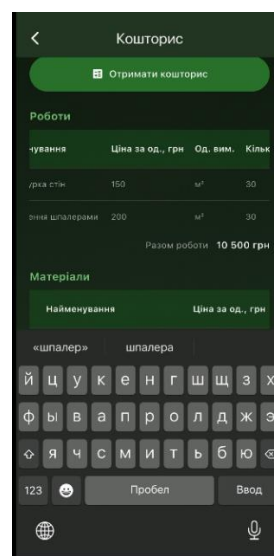


Рис. 5 – Результат розрахунку кошторису з переліком матеріалів та вартості виконаних робіт

Забезпечення зручного інтерфейсу для роботи з даними виконує представлення результатів розрахунку у вигляді структурованих таблиць, де чітко розмежовані витрати на матеріали та вартість послуг майстрів. Крім того, забезпечується надання можливості швидкого перегляду та редагування отриманих параметрів перед фінальним збереженням звіту.

Результати роботи додатку підтверджують, що обраний стек (Flutter + Swift + LiDAR + GPT-4o-mini + Isar) є найбільш прогресивним рішенням для розв'язання поставленої задачі. Це поєднання технологій мінімізує людський фактор, усуває потребу в ручних розрахунках та перетворює процес підготовки кошторису з багатоденної рутини на миттєву автоматизовану операцію.

Висновки

Результатами аналітичного та практичного дослідження доведено, що в умовах масштабної реконструкції України перехід від дискретних ручних операцій до комплексних цифрових екосистем є критично важливим для підвищення ефективності та прозорості будівельної галузі.

Розроблений та апробований додаток демонструє, що використання технології LiDAR у поєднанні з фреймворком RoomPlan дозволяє подолати обмеження традиційних методів обміру, забезпечуючи міліметрову точність фіксації геометрії приміщень та автоматичне розпізнавання семантики об'єктів.

Науково-обґрунтована та практично-реалізована взаємодія геометричного (LiDAR) та логічного (Generative AI) механізмів обробки даних дозволила вирішити проблему «технологічного вакууму» у сфері автоматичної вартісної інтерпретації результатів 3D-сканування.

Результати дослідження підтверджують, що запропоноване рішення радикально скорочує витрати часу на передпроектну підготовку, усуває суб'єктивність розрахунків та забезпечує високу якість підготовки проектної документації, що відповідає світовим трендам Industry 4.0.

Перелік використаних джерел

- [1] Barriers to the implementation of Building Information Modelling (BIM) for facility management / Durdyev S., Ashour M., Connelly S., Mahdiyar A. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103736>.
- [2] Building Information Modeling (BIM), Blockchain, and LiDAR Applications in Construction Lifecycle: Bibliometric, and Network Analysis / Faraji A. et al. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 4. Article 919. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040919>.
- [3] Characteristics-based frame-work of effective automated monitoring parameters in construction projects / A. H. Qureshi et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. Pp. 4731–4749. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07172-y>.
- [4] Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle / Olanrewaju O. I., Kineber A. F., Chileshe N., Edwards D. J. *Building and Environment*. 2022. Vol. 207. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108556>.
- [5] L. Yang. A Comprehensive Review of Artificial Intelligence Applications in Building Information Modeling (BIM) and Future Perspectives. *Journal of Computer Technology and Applied Mathematics*. 2025. Vol. 2, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.70393/6a6374616d.323635>.
- [6] Theoretical and Methodological Bases for Implementing BIM Technologies in Construction Companies: Essence, Characteristics. Economic Efficiency / Yashchenko O. F. et al. *Business Inform.* 2024. Vol. 1(552). Pp. 167-177. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-1-167-177>.
- [7] Бондаренко Д. В., Калашнікова К. Ю. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблем та перспектив розвитку. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. № 65. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2>.
- [8] Обідник М. Д., Обідник М. В. Цифровізація в будівельній галузі. Ключові тенденції розвитку технології Building Information Modeling (BIM). *Технологія Blockchain у BIM. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2025. Вип. 38(1). С. 95–101. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-1-95-101>.
- [9] Makatora D., Kubanov R. Theoretical and methodological bases for implementing the creative management technology «factory of ideals» into architectural and construction company. *Modeling the development of the economic systems*. 2024. № 4. Pp. 193-199. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-14-26>.
- [10] Heidari A., Peyvastehtar Y., Amanzadegan M. A systematic review of the BIM in construction: from smart building management to interoperability of BIM & AI. *Architectural Science Review*. 2024. Vol. 67. С. 237-254. DOI: <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2243247>.
- [11] Yang L. A Comprehensive Review of BIM and Deep Learning Integration in Innovative Practices for Architectural Digital Transformation. *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 3, no. 3. Pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.70393/6a69656173.333030>.
- [12] RoomPlan: Create a 3D model of a room using ARKit and LiDAR : Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/documentation/roomplan> (дата звернення: 28.12.2025).

- [13] flutter_roomplan 0.0.3 : Dart packages. URL: https://pub.dev/packages/flutter_roomplan (дата звернення: 28.12.2025).
- [14] RoomPlan: Create a 3D model of a room using ARKit and LiDAR : Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/documentation/roomplan> (дата звернення: 03.12.2025).
- [15] OpenAI API Reference. Models and Capabilities for Text Processing. URL: <https://platform.openai.com/docs> (дата звернення: 03.12.2025).
- [16] dart_openai 5.1.0 : Full-featured OpenAI SDK for Dart/Flutter. GitHub Repository. URL: https://github.com/Abdalkareem/dart_openai (дата звернення: 03.03.2026).
- [17] Hu L. Hybrid Edge-AI Framework for Intelligent Mobile Applications: Leveraging Large Language Models for On-device Contextual Assistance and Code-Aware Automation. *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 3, no. 3. Pp. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.70393/6a69656173.323935>.

INTELLIGENT TECHNOLOGIES FOR RENOVATION ASSESSMENT: INTEGRATING LIDAR AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Dehtiarova L.M. PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5927-9550>, e-mail: degtyareva_l_m@pstu.edu

The article examines the strategic priorities for the digital transformation of Ukraine's construction sector in the face of unprecedented post-war recovery challenges. The scale of destruction necessitates a transition from traditional manual site surveys to integrated digital ecosystems. The objective of the research is to develop and substantiate a highly efficient intelligent system for the automation of architectural measurements and the instantaneous generation of cost estimation documentation through the convergence of mobile LiDAR scanning and generative Artificial Intelligence. The research methodology is centered on a multi-layered technological stack. At the hardware level, the study utilizes the high-precision LiDAR sensors integrated into modern mobile devices, leveraging the Apple RoomPlan framework to facilitate real-time spatial data acquisition. At the software level, the cross-platform Flutter environment is employed to ensure seamless data flow between the geometric scanning module and the analytical core. A critical component of the methodology is the integration of the GPT-4o Large Language Model via API, which acts as an expert interpreter of spatial data. The results of the study demonstrate a fundamentally new approach to «digital twin» creation. The developed application enables the generation of high-fidelity 3D models of interiors with automatic semantic labeling of structural components such as walls, openings, and architectural boundaries. The key innovation lies in the system's ability to process natural language user queries (e.g., «install floor tiling and paint the walls») and correlate them with the precise geometric parameters derived from the LiDAR scan. This synergy allows for the autonomous calculation of material quantities, labor costs, and technological processes, producing a structured cost estimate in seconds. The scientific novelty of the work is represented by the formalization of a hybrid data processing model where geometric point clouds are transformed into actionable financial-technical insights without human intermediary calculations. The practical significance of the findings is profound: the proposed solution reduces the pre-design documentation phase by up to 95%, eliminates subjective errors in measurements, and provides a transparent, verifiable basis for budgeting restoration projects. Such systems represent a vital component of the Industry 4.0 paradigm, ensuring the competitiveness and transparency of the national construction industry on a global scale.

Keywords: construction digitalization; LiDAR scanning; Artificial Intelligence; GPT-4o; Flutter; RoomPlan; automated cost estimation; BIM modeling.

References

- [1] S. Durdyev, M. Ashour, S. Connelly, and A. Mahdiyar, "Barriers to the implementation of Building Information Modelling (BIM) for facility management," *Journal of Building Engineering*, vol. 46, 2022. doi: [10.1016/j.jobe.2021.103736](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103736).
- [2] A. Faraji, S. H. Arya, E. Ghasemi, P. Rahnama-yezekavat, and S. Perera, "Building Information Modeling (BIM), Blockchain, and LiDAR Applications in Construction Lifecycle: Bibliometric, and Network Analysis," *buildings*, vol. 14, no. 4, article 919, 2024. doi: [10.3390/buildings14040919](https://doi.org/10.3390/buildings14040919).
- [3] A. H. Qureshi, W. S. Alaloul, W. K. Wing, S. Saad, S. Ammad, and M. Altaf, "Characteristics-based framework of effective automated monitoring parameters in construction projects," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, pp. 4731–4749, 2023. doi: [10.1007/s13369-022-07172-y](https://doi.org/10.1007/s13369-022-07172-y).
- [4] A. H. Qureshi, W. S. Alaloul, W. K. Wing, S. Saad, S. Ammad, and M. Altaf, "Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle," *Building and Environment*, vol. 207, part b, 2022. doi: [10.1016/j.buildenv.2021.108556](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108556).

- [5] L. Yang, “A Comprehensive Review of Artificial Intelligence Applications in Building Information Modeling (BIM) and Future Perspectives,” *Journal of Computer Technology and Applied Mathematics*, 2025, vol. 2, no. 2. doi: [10.70393/6a6374616d.323635](https://doi.org/10.70393/6a6374616d.323635).
- [6] O. F. Yashchenko, D. A. Makatora, R. A. Kubanov, P. L. Zynych, and D. E. Prusov, “Theoretical and Methodological Bases for Implementing BIM Technologies in Construction Companies: Essence. Characteristics. Economic Efficiency,” *Business Inform*, vol. 1, pp. 167-177, 2024. doi: [10.32983/2222-4459-2024-1-167-177](https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-1-167-177).
- [7] D. Bondarenko, and K. Kalashnikova, “Tsyfrovizatsiia budivelnoi haluzi Ukrainy: analiz stanu, problem ta perspektiv rozvytku” [“Digitalisation of the construction industry IN Ukraine: analysis of the state, problems and development prospects”], *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, 2024. vol. № 65, 2024. doi: [10.32782/2524-0072/2024-65-2](https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2). (Ukr.)
- [8] M. D. Obidnyk, and M. V. Obidnyk, “Tsyfrovizatsiia v budivelnii haluzi. Kliuchovi tendentsii rozvytku tekhnolohii Building Information Modeling (BIM). Tekhnolohiia Blockchain u BIM” [“Digitalization in the construction industry. Key trends in the development of building information modeling (BIM) technology. blockchain technology in BIM”], *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi – Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 2025, vol. 38(1), pp. 95–101, 2025. doi: [10.31649/2311-1429-2025-1-95-101](https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-1-95-101).
- [9] D. Makatora, and R. Kubanov, “Theoretical and methodological bases for implementing the creative management technology «factory of ideals» into architectural and construction company,” *Modeling the development of the economic systems*, № 4, pp. 193-199, 2024. doi: [10.31891/mdes/2024-14-26](https://doi.org/10.31891/mdes/2024-14-26).
- [10] A. Heidari, Y. Peyvastehgar, and M. Amanzadegan, “A systematic review of the BIM in construction: from smart building management to interoperability of BIM & AI,” *Architectural Science Review*, vol. 67, pp. 237-254, 2024. doi: [10.1080/00038628.2023.2243247](https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2243247).
- [11] L. Yang, “A Comprehensive Review of BIM and Deep Learning Integration in Innovative Practices for Architectural Digital Transformation,” *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*, vol. 3, no. 3, pp. 23–31, 2025. doi: [10.70393/6a69656173.333030](https://doi.org/10.70393/6a69656173.333030).
- [12] RoomPlan: Create a 3D model of a room using ARKit and LiDAR : Apple Developer Documentation. [Online]. Available: <https://developer.apple.com/documentation/roomplan>. Accessed on: December 28, 2025.
- [13] flutter_roomplan 0.0.3 : Dart packages. [Online]. Available: https://pub.dev/packages/flutter_roomplan. Accessed on: December 28, 2025.
- [14] RoomPlan: Create a 3D model of a room using ARKit and LiDAR : Apple Developer Documentation. [Online]. Available: <https://developer.apple.com/documentation/roomplan>. Accessed on: December 03, 2025.
- [15] OpenAI API Reference. Models and Capabilities for Text Processing. [Online]. Available: <https://platform.openai.com/docs>. Accessed on: December 03, 2025.
- [16] dart_openai 5.1.0 : Full-featured OpenAI SDK for Dart/Flutter. GitHub Repository. [Online]. Available: https://github.com/Abdalkareem/dart_openai. Accessed on: December 03, 2025.
- [17] L. Hu, “Hybrid Edge-AI Framework for Intelligent Mobile Applications: Leveraging Large Language Models for On-device Contextual Assistance and Code-Aware Automation,” *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*, vol. 3, no. 3, pp. 10–22, 2025. doi: [10.70393/6a69656173.323935](https://doi.org/10.70393/6a69656173.323935).

Стаття надійшла 20.01.2026

Стаття прийнята 23.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Дегтярьова Л. М. Інтелектуальні технології оцінювання ремонтних робіт: інтеграція LiDAR та штучного інтелекту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 120–127. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359787>.

131 ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.3

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359794

ДО ПИТАНЬ МІЦНОСТІ В СИСТЕМАХ, ЩО ВИКОНУЮТЬ ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ЛІНІЙНОГО В'ЯЗКОГО ОПОРУ

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

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

Робота присвячена питанням міцності та підбору демпфуючих характеристик в механічних системах, які виконують вимушені коливання під дією періодичного збурюючого фактору в ідеальному середовищі і при наявності сил лінійного в'язкого опору. З метою дослідження напруженого стану об'єкту вивчення пропонується користуватись формулою залежності коефіцієнту динамічності від інерційних, жорсткісних, демпфуючих параметрів об'єкту та частоти збурюючої сили. При цьому, зроблені висновки: – при певному поєднанні цих параметрів амплітуда коливань (а тому – і напруження) досягають максимальних значень до настання резонансу; – для великих значень частоти збурюючого фактору напруження незначні. Надані практичні рекомендації щодо визначення величини коефіцієнту в'язкого опору, при якому: – дисипація енергії в системі буде найбільшою; – коефіцієнт запасу втомної міцності балки, на якій розташований двигун, має задану величину. Запропонований і реалізований алгоритм дій для визначення коефіцієнту запасу втомної міцності при поширених в інженерній практиці прикладах розташування двигунів з демпфером на балці і різних випадках її закріплення. При складанні диференціального рівняння руху динамічної моделі за узагальнену координату вибрана пружна деформація того перерізу балки, з яким співпадає центр ваги двигуна. Коефіцієнт жорсткості балки знайдено з тези про еквівалентність потенціальної енергії деформації балки потенціальній енергії динамічної моделі. Якщо маси балки і двигуна одного порядку, коефіцієнт зведення маси балки до узагальненої координати визначається з тези про еквівалентність кінетичної енергії балки кінетичній енергії динамічної моделі. Розглянуто приклад визначення максимальної сили або моменту, що діє на опору, де знаходиться машина з пружно-в'язкою підвіскою при виконанні вимушених коливань.

Ключові слова: вимушені коливання; коефіцієнт в'язкого опору; коефіцієнт динамічності; коефіцієнт запасу втомної міцності.

Постановка проблеми

Розвиток сучасного машинобудування характеризується зростаючими вимогами до міцності і вібростійкості об'єктів, які виконують вимушені коливання при наявності сили лінійного в'язкого опору. Зокрема, актуальними є питання щодо залежності коефіцієнту динамічності та коефіцієнту запасу втомної міцності опірної конструкції, на якій знаходиться джерело збурюючого фактору, від наступних параметрів: інерційних, жорсткісних, демпфуючих, амплітуди та частоти збурюючого фактору.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вимушені коливання двигуна на балці розглянуті в роботах [1-4], де визначаються власні частоти та максимальні напруження в балках, як функції конструктивних параметрів та механічних характеристик балки, при різних граничних умовах кріплення балок та положеннях двигуна на невагомій балці і відсутності демпфера. В роботі [5-7] визначається необхідна кількість витків пружини, що тримає невірноважену машину, за умови заданої величини коефіцієнту динамічності.

Існуючі в техніці дисипативні характеристики механічних систем та коливання машин на пружних балках розглядаються в джерелах [8, 9].

Мета статті

Дослідити міцність об'єкту при вимушених коливаннях машини з балкою чи іншою опорою, з точки зору підбору: амплітуди, частоти збурюючої сили та інерційних, жорсткісних, конструктивних і демпфуючих параметрів, які забезпечать необхідний коефіцієнт динамічності чи коефіцієнт запасу втомної міцності.

Виклад основного матеріалу

Теоретичні відомості

В техніці досить часто механічні агрегати та тіла, на яких вони закріплені, виконують вимушені коливання як в ідеальному середовищі, так і в умовах лінійного в'язкого опору. Причинами коливань можуть бути особливості технологічного процесу, наявність ексцентриситету центру мас ротора двигуна та інше. При цьому, окрім потенціальних сил, на об'єкт вивчення діє періодична збурююча сила відомої частоти.

В'язкий опір коливанням створюють сили тертя в зм'ячених кінематичних парах або в спеціально встановлених демпферах в'язкого опору, що застосовуються для зменшення напружень в елементах конструкції і в'язях. Динамічна модель (ДМ) такої механічної системи показана на Рис. 1.

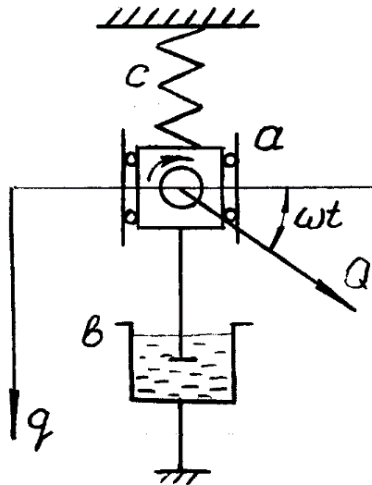


Рис. 1 – Динамічна модель механічної системи, що виконує вимушені коливання під дією періодичної збудовуючої сили, з демпфером лінійного в'язкого опору

Розглянемо випадки, коли сила в'язкого опору дорівнює похідній по узагальненій швидкості від дисипативної функції Релея. Диференціальне рівняння руху об'єкту вивчення складемо, скориставшись рівнянням Лагранжу II-го роду [10, 11]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}} + Q_i^{36},$$

де $T = \frac{1}{2} a \cdot \dot{q}^2$ – кінетична енергія, a – коефіцієнт інерції;

$\Pi = \frac{1}{2} c \cdot q^2$ – потенціальна енергія, c – коефіцієнт жорсткості;

$\Phi = \frac{1}{2} b \cdot \dot{q}^2$ – дисипативна функція, b – коефіцієнт в'язкого опору;

$Q^{36} = H \cdot \sin \omega t$ – узагальнена збудовуюча сила.

Маємо диференціальне рівняння руху об'єкту

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + k^2q = h \cdot \sin \omega t, \quad (1.1)$$

де q – узагальнена координата; $2n = \frac{b}{a}$,
 $k^2 = \frac{c}{a}$, $h = \frac{H}{a}$.

За узагальнену координату візьмемо переміщення того перерізу балки, з яким співпадає центр ваги двигуна або іншого агрегату, що генерує збудовуючу силу.

Якщо маси балки і машини, що на ній знаходиться, одного порядку, треба при побудові динамічної моделі об'єкту знати коефіцієнт зведення маси балки λ .

Застосувавши тезу про еквівалентність кінетичної енергії балки довжиною l , кінетичній енергії ДМ, центр мас якої знаходиться в перерізі балки l_1 і, скориставшись гіпотезою про те, що динамічні деформації змінюються по тому ж закону, що й статичні, маємо:

$$\frac{1}{2} \int_{m_0} \dot{y}^2 dm = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot m_0 \cdot v(l_1),$$

де m_0 – маса балки;

$y(x)$ – рівняння зігнутої осі балки.

Оскільки швидкість елемента балки dm прямо пропорційна переміщенню цього перерізу, маємо:

$$\frac{\dot{y}(x)}{v(l_1)} = \frac{y(x)}{y(l_1)}.$$

Тому коефіцієнт зведення маси балки дорівнює

$$\lambda = \frac{\int_0^l y^2(x) dx}{l \cdot y^2(l_1)}. \quad (1.2)$$

Скориставшись тезою про еквівалентність потенціальної енергії згинної деформації балки потенціальній енергії ДМ, розташованій в перерізі l_1 , та рівнянням $y(x)$, коефіцієнт жорсткості c знаходимо з формули

$$\frac{1}{2} \cdot c \cdot y^2(l_1) = \frac{1}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \int_0^l E^2 I^2 (y''(x))^2 dx$$

$$c = \frac{E \cdot I \cdot \int_0^l (y''(x))^2 dx}{y^2(l_1)}. \quad (1.3)$$

Для проєктувальників та експлуатаційників даної механічної системи важливими, зокрема, можуть бути питання:

- уникнення білярезонансних режимів коливань;
- підбору коефіцієнта b , який забезпечить найбільшу дисипацію сил опору;
- визначення коефіцієнту запасу втомної міцності балки, або інших застосованих в механічній системі в'язей.

Відповіді на ці питання можна отримати, знаючи закон руху, тобто розв'язок диференціального рівняння (1.1). Як відомо, цей розв'язок є сумою розв'язків

$$q = B \cdot e^{-nt} \cdot \sin(k_1 t + \delta) + A \cdot \sin(\omega t + \alpha).$$

Тут $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$, де $k = \sqrt{\frac{c}{a}}$ – частота власних коливань.

З часом коливання з частотою k_1 зникають, бо співмножник e^{-nt} з часом наближається до нуля. Тобто при усталеному русі маємо закон

$$q = A \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (1.4)$$

де амплітуда вимушених коливань дорівнює

$$A = \frac{h}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}, \quad (1.5)$$

$$\text{де } h = \frac{H}{a}.$$

Максимальні напруження в тілах, на які опирається двигун, прямо пропорційні амплітуді коливань. Замість того, щоб аналізувати залежність напружень від параметрів об'єкту a, b, c, ω, H , розглянемо залежність коефіцієнту динамічності K_d від цих параметрів. K_d дорівнює відношенню деформації, що виникла під дією Q^{36} , до деформації, яка виникає під дією сили, що дорівнює H . Тому коефіцієнт динамічності дорівнює

$$K_d = \frac{1}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4d^2z^2}}, \quad (1.6)$$

де коефіцієнт розладнання $z = \frac{\omega}{k}$, $d = \frac{n}{k}$.

Максимуму K_d досягає тоді, коли $f(z) = (1-z^2)^2 + 4d^2z^2$ буде мінімальною. Прирівнявши похідну $f'(z)$ нулеві, з'ясуємо, що це відбувається при значенні $z_1 = \sqrt{1-2d^2}$, бо друга похідна $f''(z_1) > 0$.

Маємо висновок: при умові $b < \sqrt{2 \cdot a \cdot c}$ амплітуда досягає максимуму для значень $\omega^2 = \frac{c}{a} - \frac{b^2}{2a^2}$, тобто до настання резонансу (коли $\omega = k = \sqrt{\frac{c}{a}}$). На рисунку 2 зображена залежність коефіцієнту динамічності K_d від z при різних значеннях параметру d , який залежить від коефіцієнту опору b , оскільки $b = 2d \cdot \sqrt{a \cdot c}$.

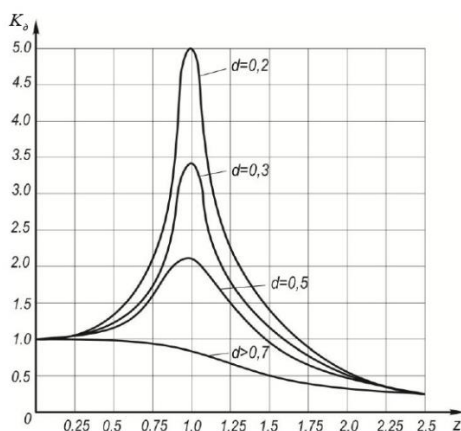


Рис. 2 – Залежність коефіцієнту динамічності K_d від z при різних значеннях коефіцієнту опору b

Маємо:

1) сила опору має суттєвий вплив на максимальні напруження в тридцятивідсотковій білярезонансній зоні;

2) для великих значень швидкості ω напруження незначні.

Враховуючи те, що $z = \omega \cdot \sqrt{\frac{a}{c}}$, $d = \frac{b}{2\sqrt{a \cdot c}}$ замість формули (1.6) маємо формулу залежності коефіцієнту динамічності від параметрів a, b, c, ω :

$$K_d = \frac{c}{\sqrt{(c - \omega^2 a)^2 + \omega^2 b^2}}. \quad (1.7)$$

Як відомо [12-15], при циклічному навантаженні об'єкту важливим є коефіцієнт запасу втомної міцності, який у випадку зміни напружень за симетричним циклом дорівнює:

$$n_\sigma = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{сер}}{\sigma_m}}, \quad (1.8)$$

де σ_a – амплітудне напруження;

σ_{-1} – межа витривалості матеріалу;

$\sigma_{сер}$ – середнє напруження від сили ваги двигуна;

σ_m – границя міцності матеріалу.

Для знаходження $\sigma_{сер}$ треба застосувати формулу

$$\sigma_{сер} = \frac{M_{3c}(\bar{P})}{W_x}, \quad (1.9)$$

де $M_{3c}(\bar{P})$ – значення згинального моменту в перерізі, що співпадає з узагальненою координатою, від дії сили ваги двигуна $\bar{P} = m_{дв} \cdot \bar{g}$;

W_x – осьовий момент опору перерізу.

$$\sigma_a = K_d \cdot \sigma_{cm}, \quad (1.10)$$

$$\text{де } \sigma_{cm} = \frac{M_{3c}(\bar{H})}{W_x}.$$

Тобто значення σ_{cm} визначається за формулою (1.9), якщо замість сили $\bar{P}$ на балку буде діяти сила, яка дорівнює $\bar{H}$ – амплітуді збурюючої сили.

Приклади

Приклад 1.

Двигун (Рис. 3) масою m_1 закріплений жорстко на станині, маса якої m_2 . Центр маси ротору m_0 знаходиться на відстані e від осі обертання ротору. Між станиною і фундаментом є шар мастила, коефіцієнт в'язкості якого b . Станина закріплена двома пружинами, загальна жорсткість пружин c . Треба визначити коефіцієнт b_* , при якому дисипація енергії буде найбільшою при рівномірному обертанні ротору з кутовою швидкістю ω .

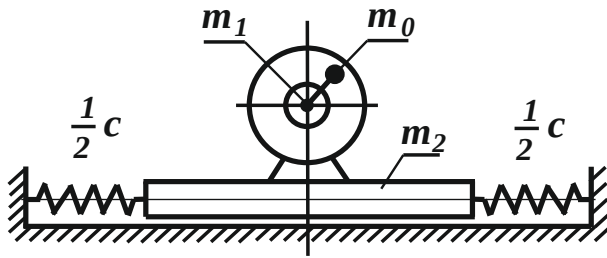


Рис. 3 – Схема до розрахунку вимушених затухаючих коливань станини з двигуном в горизонтальній площині

Розв'язання.

За узагальнену координату вибираємо переміщення центру мас системи, яке відраховуємо від положення статичної рівноваги. Збурююча узагальнена сила дорівнює $F_{зб} = H \cdot \sin \omega t$, де $H = m_0 \cdot \omega^2 \cdot e$. Диференціальне рівняння руху (1.1) має вигляд

$$\ddot{x} + 2 \cdot n \cdot \dot{x} + k^2 \cdot x = h \cdot \sin \omega t,$$

$$\text{де } 2n = \frac{b}{m_1 + m_2}, k^2 = \frac{c}{m_1 + m_2}, h = \frac{m_0 \cdot \omega^2 \cdot e}{m_1 + m_2}.$$

Згідно (1.4) та (1.5), маємо закон усталеного руху

$$x = \frac{h \cdot \sin(\omega t + \alpha)}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot \omega^2}}.$$

Щоб визначити коефіцієнт в'язкого опору b_* , знайдемо роботу сил опору $A_{тер}$, як функцію параметру b . За один період коливань $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ розсіяна енергія дорівнює

$$A_{тер} = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} b \cdot \dot{x}^2 \cdot dt = \frac{b \cdot h^2 \cdot \pi \cdot \omega}{(k^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot \omega^2}. \quad (2.1)$$

Значення коефіцієнту b_* знайдемо з умови рівності нулевій похідній від роботи сили тертя, тобто $\frac{dA_{тер}}{db} = 0$. Після диференціювання (2.1) по b , і враховуючи, що $n = \frac{b}{2a}$, отримаємо $(k^2 - \omega^2)^2 - b_*^2 \cdot \frac{\omega^2}{a^2} = 0$. Звідки маємо відповідь

$$b_* = \frac{|c - a\omega^2|}{\omega}. \quad (2.2)$$

В даному випадку $a = m_1 + m_2$.

Приклад 2.

На балках, схеми яких показані в Таблиці 1, розташований двигун, на який діє періодична збурююча сила $F_{зб}$. Амплітуда сили дорівнює H , кутова швидкість обертання ротора ω . Для зменшення напруженого стану балки під двигуном розміщено демпфер, коефіцієнт лінійного в'язкого опору якого дорівнює b . Відомі маси: двигуна – $m_{об}$, ротора – m_p , балки – m_b .

При складанні динамічного рівняння руху об'єкту вивчення за узагальнену координату вибраний прогин «у» того перерізу балки, з яким співпадає вісь симетрії двигуна.

Виходячи з тези про еквівалентність потенціальної енергії пружних деформацій об'єкту і потенціальної енергії ДМ, отримані коефіцієнти жорсткості c , що розташовані в другому стовпчику Табл.1. Для схем 5 і 6 балки вважаються жорсткими.

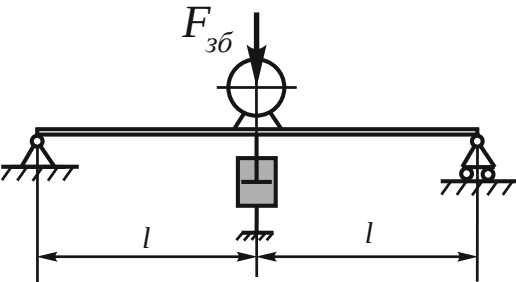
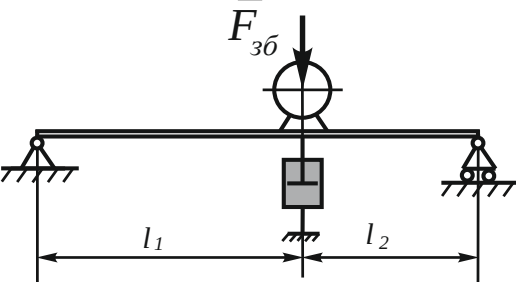
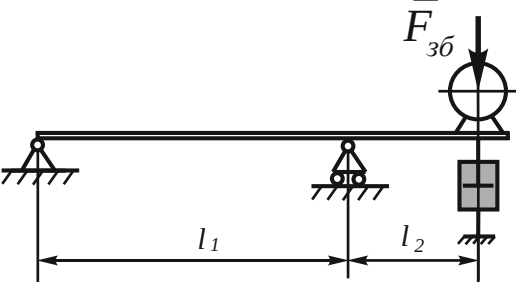
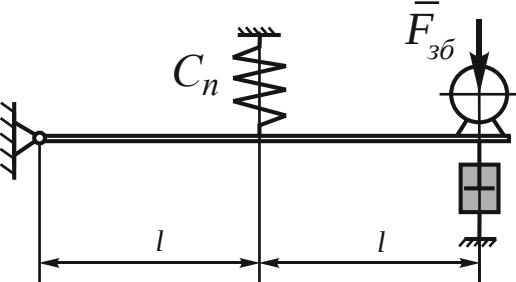
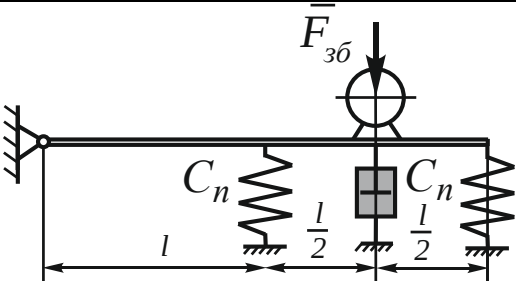
Виходячи з тези про еквівалентність кінетичної енергії об'єкту вивчення кінетичній енергії ДМ, отримані коефіцієнти інерції a , що показані в третьому стовпчику Табл.1. В схемах 3, 4, 5, 6 в коефіцієнтах інерції маса балки не врахована.

Таблиця 1

Коефіцієнти жорсткості і інерції для деяких розрахункових схем балок

№ з/п	Схема	Коефіцієнт жорсткості	Коефіцієнт інерції
1		$c = \frac{3}{8} \cdot \frac{EI_x}{l^3}$	$a = m_{\partial} + \frac{33}{140} \cdot m_{\partial}$

Продовження таблиці 1

№ з/п	Схема	Коефіцієнт жорсткості	Коефіцієнт інерції
2		$c = 6 \cdot \frac{EI_x}{l^3}$	$a = m_\partial + \frac{17}{35} \cdot m_\delta$
3		$c = 3 \cdot \frac{EI_x \cdot (l_1 + l_2)}{l_1^2 \cdot l_2^2}$	$a = m_\partial$
4		$c = 3 \cdot \frac{EI_x}{l_2^2 \cdot (l_1 + l_2)}$	$a = m_\partial$
5		$c = \frac{c_n}{4}$	$a = m_\partial$
6		$c = \frac{20}{9} \cdot c_n$	$a = m_\partial$

Мета – визначити коефіцієнт запасу втомної міцності балок.

Алгоритм дій при визначенні коефіцієнту запасу втомної міцності балок, наведених в Табл.1 (з наперед визначеним коефіцієнтом b_*), представлений в Табл. 2.

Таблиця 2

Алгоритм дій при визначенні коефіцієнту запасу втомної міцності балок

Номер дії	Дано: положення двигуна на балці, маса двигуна m_{∂} , маса балки m_b ; форма перерізу балки: I_x , W_x ; матеріал балки: E , σ_{-1} , σ_M .	Знайти (a , c – див. табл.1)
1	Дано: ω - швидкість збурюючої сили	$b_* = \frac{ c - a\omega^2 }{\omega}$
2	В залежності від схеми	$M_{3z} (m_{\partial} \cdot \bar{g})$ $\sigma_{сер} = \frac{M_{3z}(\bar{P})}{W_x}$
3	В залежності від схеми	$M_{3z} (\bar{H})$ $\sigma_{cm} = \frac{M_{3z}(H)}{W_x}$
4		$\sigma_a = K_{\partial} \cdot \sigma_{cm}$
5		$n_{\sigma} = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{сер}}{\sigma_M}}$

Приклад 3.

Умова. На сталій балці (Рис. 4) закріплений двигун, який має незбалансований ротор, радіус дисбалансу e , кутова швидкість ротору ω . Балка має прямокутний перетин $b_1 \times h_1$, механічні характеристики: E , σ_M , σ_{-1} . Вертикальна збурююча сила дорівнює $F_{3\phi} = m_p \cdot \omega^2 \cdot e \cdot \sin \omega t$.

Мета. Підібрати характеристику демпфера b таку, при якій коефіцієнт запасу втомної міцності балки дорівнює 2.

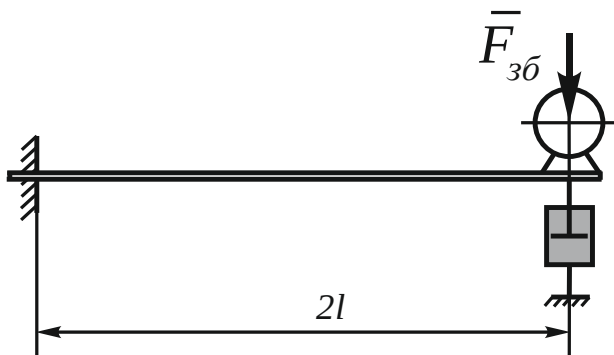


Рис. 4 – Схема балки з незбалансованим двигуном і демпфером

Дано: маси m_b , m_{∂} , $m_p \longrightarrow a = m_{\partial} + \frac{33}{140} \cdot m_b$,
 $H = m_p \cdot \omega^2 \cdot e$.

Балка:

$2l$, E , σ_{-1} , σ_M ; $I_x = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$, $W_x = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} \longrightarrow c = \frac{3}{8} \cdot \frac{EI_x}{l^3}$.

Визначити: b .

Розв'язання

Згідно формули (1.8), маємо:

$$2 = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{сер}}{\sigma_M}} \longrightarrow \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{сер}}{\sigma_M} = \frac{1}{2} \quad (2.3)$$

Згідно формули (1.9) : $\sigma_{сер} = \frac{m_{\partial} \cdot g \cdot 12 \cdot l}{b_1 \cdot h_1^2}$,

$$\sigma_{сер} = \frac{12 \cdot l \cdot m_p \cdot \omega^2 \cdot e}{b_1 \cdot h_1^2}.$$

Згідно формул (1.7), (1.10):

$$\sigma_a = \frac{c}{\sqrt{(c - \omega^2 a)^2 + \omega^2 b^2}} \cdot \sigma_{cm}.$$

Невідому характеристику демпфера b знайдемо після підстановки σ_a , σ_{-1} , $\sigma_{сер}$, σ_M в формулу (2.3).

Приклад 4. – Застосування пружно-в'язкої підвіски

Теоретичні відомості.

В інженерній практиці досить часто зустрічаються випадки, коли незбалансована машина знаходиться на жорсткій плиті, яка закріплена до опорних елементів фундаменту. При цьому, періодична збурююча сила $Q_{3\phi} = H \cdot \sin \omega t$ через плиту діє на елементи фундаменту, створюючи в них певні напруження. Якщо жорстка плита розміщена на пружних елементах (наприклад, пружинах) і може виконувати тільки вертикальні коливання, власну частоту об'єкту легко знайти при відомій сумарній жорсткості пружин та вазі двигуна з плитою. При цьому, якщо застосовуються сталеві пружини, непружний опір майже відсутній. Якщо застосовуються засоби демпфування з використанням високомолекулярних сполук або матеріалів з високим коефіцієнтом розсіювання внутрішньої енергії при деформуванні (гумові, еластомірні, поліуретанові, пробкові прокладки, тощо), коливання відбуваються в умовах в'язкого опору. Саме такі матеріали застосовують, наприклад, в поглинаючих апаратах залізничних вагонів, де треба забезпечити найшвидше припинення коливань.

Будемо вважати, що сила в'язкого опору підвіски пропорційна швидкості коливань. Ці умови можна змоделювати за допомогою комбінації ідеально пружних пружин та гідравлічного амортизатора (демпфера), як показано на Рис. 1. В умовах в'язкого опору найбільша сила, що буде діяти на фундамент з боку

демпфера, може бути визначена за формулою, яка наведена в роботі «Коливання в інженерній справі», С.П. Тимошенко

$$F\delta\sqrt{1 + \left(\frac{b}{a} \cdot \frac{\omega}{k^2}\right)^2}_{max}, \quad (2.4)$$

де H – амплітуда збурюючої сили, a – коефіцієнт інерції, b – коефіцієнт в'язкого опору, k – власна частота, ω – частота збурюючої сили.

Коефіцієнт динамічності, згідно формули (1.6), дорівнює

$$K_d = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)^2 + \left(\frac{b}{a} \frac{\omega}{k^2}\right)^2}}. \quad (2.5)$$

Якщо пружини вибрані так, що власна частота об'єкту вивчення у порівнянні з частотою збурюючої сили невелика (тобто відношення $\frac{\omega}{k}$ – велике), амплітуда вимушених коливань буде малою (про це свідчать графіки Рис. 2) в порівнянні з переміщеннями, які виникли при статичній дії сили $Q_{зб}$.

Визначена сила F_{max} дозволяє виконати розрахунки на міцність як самих вузлів демпфування, так і опорних елементів фундаменту.

Умова задачі

При роботі однофазного генератора, електричні сили створюють змінний крутний момент, що залежить від кутової швидкості ротора

$$M = M_0 + M_1 \cdot \sin \omega t,$$

де ω – кутова швидкість ротора, t – час;

M_0, M_1 – постійні величини.

Статор генератору (Рис. 5) бічними лапами спирається на опорні елементи фундаменту. Реакції опор можна знайти, розглянувши дію постійного і змінного моментів окремо. В обох випадках отримані реакції будуть створювати відповідні пари сил, що протидіють активним моментам.

При дії постійного моменту M_0 реакції опор можна визначити з рівнянь рівноваги статички. Ця статична складова реакцій не змінюється з часом.

При дії змінного моменту $M_1 \cdot \sin \omega t$ статор буде виконувати вимушені обертальні коливання, які призведуть до появи динамічних складових реакцій. Проте, для довільного моменту часу завжди буде виконуватись правило – активний момент урівноважується моментом сил реакцій.

Повне навантаження на опори і відповідно реакції є сумою статичних і динамічних складових.

Для зниження рівня динамічних навантажень опорні вузли машини окрім пружних елементів можуть забезпечуватись демпферами в'язкого опору. Тоді, при розв'язанні задачі, основною проблемою є

визначення навантаження, з яким машина діє на опору при наявності демпфера.

Спробуємо визначити це навантаження, використовуючи підходи, запропоновані вище.

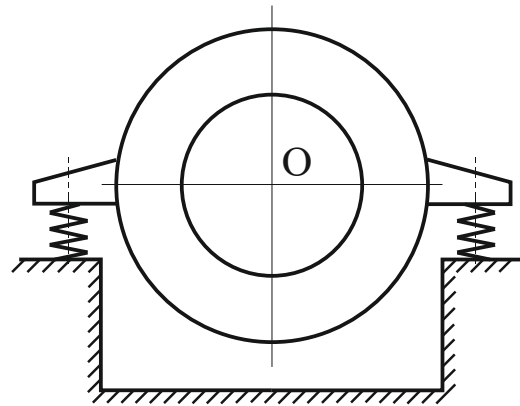


Рис. 5 – Генератор на пружно-в'язких опорах

Будемо вважати, що сила реакції пружин складається з двох частин: пружної, пропорційної деформації пружин, та сили демпфування, пропорційної швидкості. Якщо позначити через φ кут повороту статора при коливаннях, маємо, згідно рівняння Лагранжа II роду, диференціальне рівняння руху

$$I \cdot \ddot{\varphi} + b \cdot \dot{\varphi} + c \cdot \varphi = M_1 \cdot \sin \omega t, \quad (2.6)$$

де I – момент інерції статора; b – момент пари сил в'язкого опору при кутовій швидкості, що дорівнює одиниці; c – коефіцієнт жорсткості, який виражає крутний момент, що забезпечує кут повороту статора на один радіан.

Використовуючи позначення, прийняті в рівнянні (1.1) $2n = \frac{b}{I}$, $k^2 = \frac{c}{I}$, $h = \frac{M_1}{I}$, замість (2.6) маємо:

$$\ddot{\varphi} + 2n \cdot \dot{\varphi} + k^2 \cdot \varphi = h \cdot \sin \omega t.$$

Після розв'язку рівняння маємо можливість знайти максимальний крутний момент, з яким генератор, навантажений змінним моментом $M_1 \cdot \sin \omega t$, діє на опори при встановлених демпферах в'язкого опору.

Величина цього моменту згідно (2.4) дорівнює

$$M_{max} = \frac{M_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{b}{I} \frac{\omega}{k^2}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)^2 + \left(\frac{b}{I} \frac{\omega}{k^2}\right)^2}}. \quad (2.7)$$

Відомі моменти M_0 та M_{max} дозволять визначити повні максимальні реакції опор генератору з подальшим аналізом міцності опорних вузлів і елементів фундаменту.

Висновки

1) Запропонований і реалізований на прикладах коливань двигуна на вагомій балці алгоритм визначення коефіцієнту втомної міцності при попередньо вибраному коефіцієнту в'язкого опору демпфера, що забезпечує найбільшу дисипацію енергії.

2) Максимальні значення сили та крутного моменту, які діють при вимушених коливаннях на опорі, де знаходиться машина з пружно-в'язкою підвіскою, знайдені як функції інерційних, жорсткісних, демпфуючих параметрів об'єкту та частоти і амплітуди збурюючого фактору.

Перелік використаних джерел

- [1] Бейгул О. О., Колеснік І. А. Динаміка та міцність машин : навчальний посібник. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2011. 120 с.
- [2] Laura P. A. A., Filipich C. P., Cortinez V. H. Vibrations of beams and plates carrying concentrated masses. *Journal of Sound and Vibration*. 1987. Vol. 117, № 3. Pp. 459–465. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(87\)80065-2](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(87)80065-2).
- [3] Effect of concentrated masses with rotary inertia on vibrations of rectangular plates / Amabili M., Pellegrini M., Righi F., Vinci F. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 295, № 1–2. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.035>.
- [4] Чихладзе Е. Д., Берестянська С. Ю., Лисяков І. М. Динамічні розрахунки конструкцій : підручник. Харків: Укр.ДУЗТ, 2015. 161 с.
- [5] Основи теорії коливань та стійкості рухомого складу: навч. посібник / Устенко О. В., Візньак Р. І., Ловська А. О., Рибін А. В. Харків: Укр. ДУЗТ, 2021. 129 с.
- [6] Boresi A. P., Schmidt R. J. Advanced mechanics of materials. 6th ed. New York: Wiley, 2002. 704 p.
- [7] Bokaian A. Natural frequencies of beams under compressive axial loads. *Journal of Sound and Vibration*. 1988. Vol. 126, № 1. Pp. 49–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(88\)90397](https://doi.org/10.1016/0022-460X(88)90397).
- [8] Механіка віброактивності та віброзахисту машин : навч. посібник / Огурцов А. П., Мамаєв Л. М., Скрипник Е. Т., Зінченко В. І. Київ : НМЦ ВОіНУ, 2002. 368 с.
- [9] Inman D. J. Engineering vibration. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009. 669 p.
- [10] Коливання неконсервативних механічних систем : монографія / Бабенко А. Є., Боронко О. О., Лавренко Я. І., Трубочев С. І. Київ : Нац. техн. ун-т України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. 153 с.
- [11] Meirovitch L. Methods of analytical dynamics. New York: McGraw-Hill, 1970. 524 p.
- [12] Пекельний М. І., Дібор О. Г. Розрахунок на міцність при дії повторно-змінного навантаження : учбовий посібник. Харків: Нац. аерокосм. ун-т, Харківський авіац. інститут, 2004. 74 с.
- [13] Suresh S. Fatigue of materials. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 180 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806575>.
- [14] Dowling N. E., Kampe S. L., Kral M. V. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue. 5th ed., global ed. Harlow: Pearson, 2020. 964 p.
- [15] Pook L. Metal fatigue: what it is, why it matters. *Solid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht: Springer, 2007. 271 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5597-3>.

ON STRENGTH ISSUES IN SYSTEMS PERFORMING FORCED VIBRATIONS IN THE PRESENCE OF LINEAR VISCOUS RESISTANCE

Karpenko T.M.

PhD (Physics and Mathematical Sciences), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4042-0301>, e-mail: karpenko_t_n@pstu.edu;

Shishkin V.V.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-2180>, e-mail: shishkin_v_v@pstu.edu

The work is devoted to the issues of strength and selection of damping characteristics in mechanical systems that perform forced oscillations under the action of a periodic disturbing factor in an ideal environment and in the presence of linear viscous resistance forces. In order to study the stressed state of the object of study, it is proposed to use the formula for the dependence of the dynamic coefficient on the inertial, stiffness, damping parameters of the object and the frequency of the disturbing force. At the same time, the conclusions are made: - with a certain combination of these parameters, the amplitude of the oscillations (and therefore the stresses) reach maximum values before resonance; - for large values of the frequency of the disturbing factor, the stresses are insignificant. Practical recommendations are given for determining the value of the viscous resistance coefficient at which: - energy dissipation in the system will be the greatest; - the fatigue strength reserve coefficient of the beam on which the engine is located has a given value. An algorithm of actions for determining the fatigue strength reserve factor for common examples of engine locations with a damper on a beam and various cases of its fastening in engineering practice is proposed and implemented. When compiling the differential

equation of motion of the dynamic model, the elastic deformation of the beam section with which the center of gravity of the engine coincides was chosen as the generalized coordinate. The beam stiffness coefficient was found from the thesis on the equivalence of the potential energy of the beam deformation to the potential energy of the dynamic model. Since the masses of the beam and the engine are of the same order, the coefficient of reducing the beam mass to the generalized coordinate is determined from the thesis on the equivalence of the kinetic energy of the beam to the kinetic energy of the dynamic model. An example is considered when the disturbing force has two components. Differential equations of motion are compiled, a frequency equation is obtained, by solving which it is possible to select the frequency of the disturbing force for the non-resonant mode. Formulas for the amplitude of forced oscillations are obtained.

Keywords: forced oscillations; viscous drag coefficient; dynamic coefficients; fatigue strength reserve coefficient.

References

- [1] O. O. Beihul, and I. A. Kolesnik, *Dynamika ta mitsnist mashyn : navchalnyi posibnyk* [Dynamics and strength of machines: a textbook]. Dniprodzerzhynsk, Ukraine; DDTU Publ., 2011. (Ukr.)
- [2] P. A. A. Laura, C. P. Filipich, and V. H. Cortínez, "Vibrations of beams and plates carrying concentrated masses," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 117, № 3, pp. 459–465, 1987. doi: 10.1016/S0022-460X(87)80065-2.
- [3] M. Amabili, M. Pellegrini, F. Righi, and F. Vinci, "Effect of concentrated masses with rotary inertia on vibrations of rectangular plates," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, № 1-2, pp. 1–12, 2006. doi: 10.1016/j.jsv.2005.11.035.
- [4] E. D. Chykhладze, S. Yu. Berestianska, and I. M. Lysiakov, *Dynamichni rozrakhunky konstruktsii : pidruchnyk* [Dynamic calculations of structures: textbook]. Kharkiv, Ukraine: Ukr.DUZH Publ., 2015. (Ukr.)
- [5] O. V. Ustenko, R. I. Vizniak, A. O. Lovska, and A. V. Rybin, *Osnovy teorii kolyvan ta stiihosti rukhomoho skladu: navch. posibnyk* [Fundamentals of the theory of vibrations and stability of rolling stock: a textbook]. Kharkiv, Ukraine: Ukr.DUZH Publ., 2021. (Ukr.)
- [6] A. P. Boresi, and R. J. Schmidt, *Advanced mechanics of materials*, 6th ed., New York: Wiley, 2002.
- [7] A. Bokaian, Natural frequencies of beams under compressive axial loads, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 126, № 1, pp. 49–65, 1988. doi: 10.1016/0022-460X(88)90397.
- [8] A. P. Ohurtsov, L. M. Mamaiev, E. T. Skrypnyk, and V. I. Zinchenko, *Mekhanika vibroaktyvnosti ta vibrozakhystu mashyn : navch. posibnyk* [Mechanics of vibration activity and vibration protection of machines: a textbook]. Kyiv, Ukraine: NMC VOiNU, 2002. (Ukr.)
- [9] D. J. Inman, *Engineering vibration*, 3rd ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009.
- [10] A. Ye. Babenko, O. O. Boronko, Ya. I. Lavrenko, and S. I. Trubachev, *Kolyvannia nekonservatyvnykh mekhanichnykh system : monohrafiia* [Oscillations of non-conservative mechanical systems: monograph]. Kyiv, Ukraine: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Publ., 2020. (Ukr.)
- [11] L. Meirovitch, *Methods of analytical dynamics*. New York, USA: McGraw-Hill, 1970.
- [12] M. I. Pekelnyi, and O. H. Dibor, *Rozrakhunok na mitsnist pry dii povtorno-zminnoho navantazhennia : uchbovyi posibnyk* [Strength calculation under repeated alternating loading: a training manual]. Kharkiv, Ukraine: National Aerospace University, Kharkiv Aviation Institute, 2004. (Ukr.)
- [13] S. Suresh, *Fatigue of materials*, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2012. doi: 10.1017/CBO9780511806575.
- [14] N. E. Dowling, S. L. Kampe, and M. V. Kral, *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue*, 5th ed., global ed., Harlow: Pearson, 2020.
- [15] L. Pook, "Metal fatigue: what it is, why it matters," in *Solid Mechanics and Its Applications*, Dordrecht: Springer, 2007. doi: 10.1007/978-1-4020-5597-3.

Стаття надійшла 19.02.2026

Стаття прийнята 13.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Карпенко Т. М., Шишкін В. В. До питань міцності в системах, що виконують вимушені коливання при наявності лінійного в'язкого опору. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 1. С. 128–136. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359794>.

СТАБІЛІЗАЦІЯ КОНФІГУРАЦІЇ КРОМОК ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ
ПРИ ЇХ НАПЛАВЛЕННІ АБО ЗВАРЮВАННІ ПО ТОРЦЮ

Перемітько В.В.	д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9032-6116 , e-mail: vperemitko1965@gmail.com ;
Коломоєць І.В.	PhD, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3650-2929 , e-mail: ikolomoyets94@gmail.com ;
Носов Д.Г.	канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1588-684X , e-mail: nosov_dstu@ukr.net ;
Чумак М.С.	аспірант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське;
Давидюк А.В.	PhD, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3688-3455 , e-mail: anzhela8848@gmail.com

В роботі розглянуто проблему забезпечення геометричної стабільності та підвищення ресурсу тонкостінних деталей при наплавленні або зварюванні по кромці. Показано, що для таких елементів характерне поєднання інтенсивних термічних деформацій, високих залишкових напружень і швидкого зносу, що суттєво обмежує застосування традиційних технологій наплавлення. Проаналізовано умови експлуатації тонкостінних деталей, основні механізми їх зносу, а також існуючі конструктивні та технологічні рішення, спрямовані на зменшення деформацій. Виконано розрахунок потенційного прогину тонкостінної деталі зі сталі 9ХФ товщиною 4 мм при наплавленні за режимів MIG/MAG, який показав, що за відсутності фіксації величина залишкового вигину може досягати 23...25 мм, що є технологічно неприйнятним. Запропоновано конструкцію пристрою для наплавлення тонкостінних деталей, яка поєднує формувальну канавку, систему контактних роликів притискачів і мідну примусово охолоджувану основу. Обґрунтовано, що таке поєднання дозволяє змінити граничні умови закріплення, зменшити ексцентриситет дії усадочних сил, стабілізувати температурний режим і суттєво знизити деформації. Сформульовано гіпотези щодо адаптації запропонованого пристрою для наплавлення тонкостінних тіл обертання, зокрема дискових ножів, із урахуванням вимог до балансування та проблеми зварювання краєра.

Ключові слова: тонкостінні деталі; наплавлення по кромці; залишкові напруження; термічні деформації; прогин; роликові притискачі; формувальна канавка; примусове охолодження; тіла обертання; дискові ножі.

Постановка проблеми

У різних видах сучасної промисловості зростає потреба у підвищенні зносостійкості та довговічності тонкостінних деталей, що працюють в умовах високих механічних і теплових навантажень. Технології наплавлення дозволяють локально зміцнювати поверхні без повного нагрівання заготовки. Проте при нанесенні шару або виконанні шва по торцю тонкостінного елемента виникають значні термічні деформації, що призводять до викривлення та зміни геометрії. Ці ефекти обмежують застосування технології, особливо при виробництві деталей складної форми або з низькою теплопровідністю.

Тому актуальним є створення конструкцій пристроїв, які забезпечують контроль геометрії тонкостінної деталі під час її виготовлення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Знос є суттєвим фактором, який пришвидшує вихід тонкостінних деталей з ладу. Внаслідок невеликої товщини стінки, навіть незначне пошкодження поверхні може критично знизити несучу здатність конструкції. Для тонкостінних елементів, таких як дискові

ножі, що слугують для обробки матеріалів різних типів, фасонні диски агрегатів ґрунтообробної техніки особливо небезпечним є ерозійний механізм зносу [1-3]. Внаслідок тертя відбувається розхитування та виведення матеріалу, тоді як ударна дія рідини, впроваджуючись у мікротріщини, діє подібно до клина, розсовуючи стінки і прискорюючи локальне руйнування. Це означає, що ерозія не просто викликає стоншення, а й створює нелінійний, прискорений механізм деградації.

Абразивний знос також є одним із найбільш критичних і шкідливих видів руйнування для тонкостінних елементів, зокрема для тих, що застосовуються під час переробки паперу, картону, деревини чи пластмас. Його негативний вплив пояснюється низькою взаємопов'язаних факторів. Насамперед, абразивні частинки діють як мініатюрні різці, вириваючи матеріал із поверхні леза та руйнуючи його мікроструктуру. Це спричиняє швидку втрату гостроти ріжучої кромки, що, у свою чергу, збільшує зусилля різання, навантаження на привід, підшипники і механізми, підвищує енергоспоживання та погіршує якість різку.

Унаслідок зносу замість чистого різання матеріал піддається рванню або пластичній деформації, що є

критичним при високих вимогах до точності обробки. Часте переточування призводить до стоншення леза, зниження його жорсткості та підвищеної схильності до вібрацій і деформацій, що зменшує надійність і безпеку експлуатації. Висока інтенсивність зносу зумовлює часті зупинки обладнання для обслуговування, скорочуючи ефективний ресурс ножів [4-6].



Рис. 1 – Жолоблення кромки при вільному накладанні валика

Крім того, в ряді робіт [7-8] зазначається, що для тонкостінних деталей характерне дуже швидке охолодження через високе співвідношення площі поверхні до об'єму (за винятком випадків попереднього підігріву). Швидкість охолодження безпосередньо впливає на ступінь розвитку супутніх процесів і зміну первісних властивостей металу. Дослідження показують, що забезпечення високої якості зварювання та максимальної продуктивності для заданої товщини виробу вимагає ретельного вибору режиму зварювання, оскільки навіть зміна швидкості нагріву може бути використана для зменшення небажаних структурних змін. Виникнення залишкових напружень в тонкостінних елементах негативно впливає на їх геометричні параметри. Це призводить до значного жолоблення (рис. 1 [9]), що особливо помітно під час наплавлення згаданих вище різальних або фасонних дисків, де навіть незначна асиметрія теплового поля може спричинити викривлення, що ускладнює подальші технологічні операції та знижує точність складання. У таких випадках необхідні спеціальні заходи: контролювання теплового циклу, використання притискачів, теплових пасток або інтенсивного керованого охолодження – для збереження геометрії та мінімізації залишкових деформацій.

Чимало рішень із запобігання даним проблемам пропонувалося в сфері зварювання та споріднених технологій. Відомі рішення у галузі наплавлення тонкостінних деталей передбачають використання систем охолодження, теплових екранів та індукторів спеціальної конфігурації.

Аналіз наявних технічних розробок свідчить, що існуючі конструкції обладнання для наплавлення тонкостінних дискових та кільцевих заготовок були

розроблені для вирішення схожих технологічних задач, хоча використовують різні інженерні підходи.

Відоме технічне рішення, описане у роботі [10], передбачає застосування двох кільцевих витків індуктора, розташованих у протифазі, а також використання теплових екранів для зменшення втрат тепла. Така компоновка сприяє більш рівномірному розподіленому нагріванню та підвищенню енергоефективності процесу. Однак у конструкції відсутні засоби, спрямовані на компенсацію деформацій, що виникають у тонкостінних деталях під час локального нагрівання. Через це геометрична стабільність заготовки залежить лише від її власної жорсткості, що може бути недостатнім у випадку малих товщин.

У розробці, наведеній у роботі [11], зроблено акцент на інтенсифікації тепловідводу: конструкція передбачає циркуляцію холодоагенту, тобто елемент примусового охолодження, який знижує пікові температури та впливає на формування структури наплавленого шару. Проте відсутність засобів стабілізації положення заготовки під час наплавлення обмежує можливість контролю залишкових деформацій, що є критично важливим для тонких дискових компонентів.

Конструкція пристрою для протидії деформаціям, що описана в роботі [12], включає в себе притискні плити з виточками, покриті теплоізоляційним матеріалом. Такий підхід забезпечує більш рівномірний розподіл зусиль та зниження локальних температурних градієнтів. Водночас конструкція характеризується підвищеною складністю та вимогливістю в експлуатації: необхідністю видалення шихти, контролем шлаковиділення та загальною трудомісткістю підготовчих операцій. Це обмежує її практичну застосовність у серійному або потоковому виробництві.

Перші способи, описані ще у класичних роботах з ремонту деталей сільськогосподарських машин, передбачали напання порошкоподібного твердого сплаву на поверхню диска з його подальшим індукційним нагріванням понад температуру плавлення сплаву [13]. Такі технології забезпечують задовільну якість зміцненого шару, однак мають істотні недоліки – високі витрати електроенергії, утворення крупнозернистої структури та значні термічні деформації, які потребують додаткової операції механічного рихтування для відновлення плоскопаралельності дисків. Пізніше у роботах [14, 15] були запропоновані способи, що передбачають обертково-поступальне переміщення диска в момент початку плавлення порошку. Диск здійснює 10...60 циклів/хв із кутом повороту 0...90°. Таке механічне переміщення сприяє подрібненню структури наплавленого металу, зменшенню температурних градієнтів та стабілізації геометрії диска після охолодження. Експериментальні дослідження показали, що введення обертально-поступального руху дозволяє зменшити прогин диска приблизно на 20...25 %, а також підвищити рівномірність товщини наплавленого шару на 10...12 %.

Окремий напрям пов'язаний із розвитком технічних засобів для підвищення точності та

продуктивності наплавлення. Зокрема, розроблено установку, що містить стіл з кількома кільцевими індукторами, потужність яких пропорційна діаметру, та вертикально рухому охолоджувальну плиту з прямокутними трубопроводами для примусового охолодження диска після формування наплавленого шару. Застосування кількох індукторів із різними рівнями температури дозволяє формувати керований температурний градієнт за радіусом диска, що знижує залишкові напруження та підвищує точність геометрії виробу.

У деяких випадках проблема підвищення ресурсу тонкостінних деталей може бути вирішена не суцільним наплавленням робочої поверхні, а приварюванням спеціальної кромки. Такий підхід доцільний тоді, коли основний знос зосереджений у вузькій приповерхневій зоні, тоді як об'єм матеріалу деталі зберігає достатню несучу здатність. Приварна кромка, виготовлена з більш зносостійкого або композиційного матеріалу, дозволяє локалізувати тепловий вплив, зменшити сумарне тепловкладення у тонкостінну заготовку та, відповідно, обмежити рівень залишкових деформацій. Крім того, геометрично сформована кромка може виконувати функцію технологічного компенсатора: її форма та положення задають напрямок пластичної деформації під час зварювання або наплавлення, що спрощує керування геометрією деталі та знижує вимоги до подальших правних операцій.

Отже, аналіз відомих рішень показує, що жоден із них не забезпечує комплексного усунення деформацій, ефективного відведення тепла та формування стабільної геометрії тонкостінної деталі під час наплавлення.

Мета статті

Метою роботи було удосконалення конструкції пристрою для наплавлення тонкостінних деталей таким чином, щоб конструктивні рішення сприяли мінімізації термічних деформацій та забезпеченню стабільної геометрії наплавленої поверхні.

Матеріали та методи

Конкретний технічний результат планувалося досягти шляхом інтеграції нових функціональних елементів у конструкцію: введення формувальної канавки у станині, застосування контактних роликів притискачів, оснащення пристрою системою примусового охолодження.

Очікується, що це дозволить стабілізувати температурний режим, зменшити теплові деформації та забезпечити керовану геометрію поверхні деталі, що, зрештою, підвищить ефективність наплавлення та якість кінцевого продукту.

За класичною методикою та згідно до схеми (рис. 2), наведеними в [16], було визначено ймовірну величину викривлення кромки та залишкових напружень для випадку пластини товщиною 4 мм зі сталі 9ХФ, на яку наплавляється валик шириною 20 мм, електродним дротом діаметром 1,2 мм, силою струму

100 А, напругою на дузі 20 В, швидкістю зварювання 35 м/год. Класичний випадок нагріву кромки пластини наведено на рисунку 1. Вихідні дані та результати розрахунків наведено в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Вихідні дані до розрахунку

Параметр	Значення	Одиниці
Матеріал	Сталь 9ХФ	-
Товщина, t	4	мм
Ширина валика, w	20	мм
Процес	MIG/MAG	-
Сила струму, I	100	А
Напруга, U	20	В
Швидкість, v	35	м/год

Попередній оціночний розрахунок включав наступні етапи:

1. Розрахунок погонної енергії дугового процесу

$$q = \frac{I \cdot U \cdot 60}{v}.$$

2. Визначення ширини зони пластичних деформацій (b_p) за експериментально аналітичними залежностями, подібними до методики Трочуна–Прохоренка, що враховують тепловклад, товщину δ та тип сталі. Для інструментальних сталей при $\delta \leq 4$ мм зона, що нагрівається до температур понад 700...750 °С, зазвичай становить 10...15 мм. Це відповідає областям, у яких формується пластичне скорочення, еквівалентне прикладеній поздовжній усадочній деформації.

3. Оцінка/розрахунок середньої усадочної деформації ε_p для тонких сталей при MIG/MAG-наплавленні лежить у межах 0,004...0,006. Усадочна сила на переріз штабика визначається як:

$$P_{yc} = E \cdot \delta \cdot b_p \cdot \varepsilon_p,$$

де E – модуль пружності, МПа;

b_p – ширина зони пластичних деформацій стискання (ЗПДС), мм;

ε_p – середня пластична деформація вільної усадки в ЗПДС, 0,0045...0,0055.

Оскільки валик наплавляється з відступом від краю, центр зони пластичних деформацій розташований поза нейтральною віссю перерізу. Ексцентриситет визначається геометрично залежно від висоти штабика h , ширини зони пластичних деформацій та відступу шва. Згинальний момент:

$$M = P_{yc} \cdot e,$$

де P_{yc} – усадкова сила, Н;

e – відстань від центру перерізу, мм.

Для елемента, що під час наплавлення лежить вільно (без жорсткого закріплення), поведінка відповідає моделі балки на двох опорах або, у спрощенні, вільно лежачої смуги довжиною L . Максимальна стріла вигину посередині:

$$f_{\max} = \frac{ML^2}{8EI},$$

де M – згинальний момент, Н·мм;

L – довжина штабика, мм;

I – момент інерції перерізу, визначається за формулою:

$$I = \frac{h\delta^3}{12}.$$

Ураховуючи термопружно-пластичні явища, отриманий прогин коригується:

$$f_{\text{реальне}} = f_{\max} \cdot k.$$

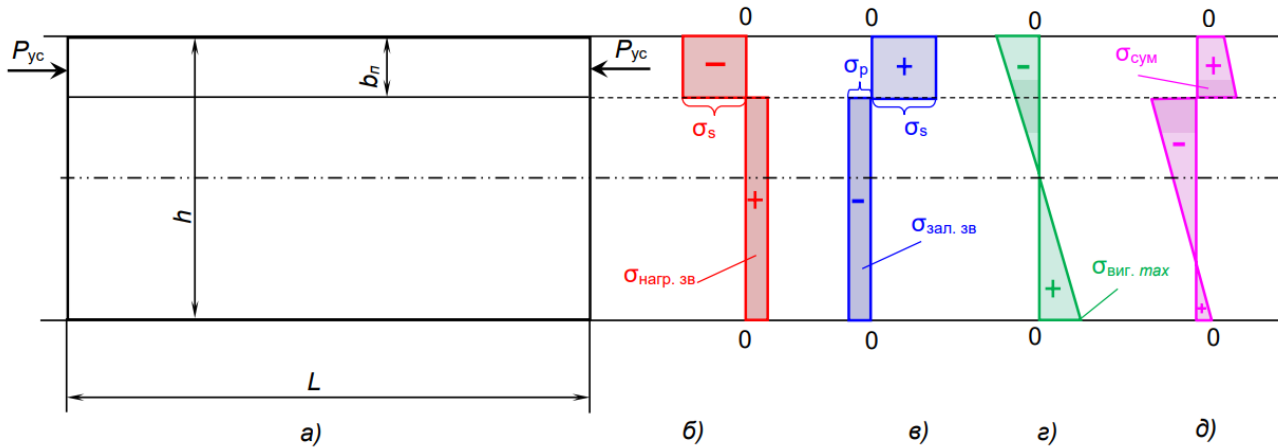


Рис. 2 – Схема розподілу залишкових напружень при нагріві краю пластини: а) загальний вигляд пластини; б) поздовжні напруження під час нагріву; в) поздовжні залишкові напруження; г) напруження від вигину; д) сумарні напруження

Таблиця 2

Результати розрахунків

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Лінійна енергія	q	400	Дж/мм
Ефективна ширина ЗПДС	b_p	14	мм
Середня пластична усадка	ε_p	0,005	–
Модуль пружності (Е)	E	210000	МПа
Усадочна сила (поздовжня)	P_{yc}	58 800	Н
Ексцентриситет центру ЗПДС від нейтральної осі	e	21.5	мм
Згинальний момент	M	1 264	Н·м
Момент інерції перерізу	I	266.67	мм ⁴
Максимальна теоретична стріла (вільний штабик)	$f_{\max}$	28.1	мм
Скоригована (реальна) стріла $k \approx 0.83$)	$f_{\text{реальне}}$	$\approx 23-25$	мм

Виклад основного матеріалу

Розрахункові дані показали, що при наплавленні одного поздовжнього валика по краю штабика розміром 100×50×4 мм зі сталі 9ХФ виникає значний залишковий вигин – близько 23...25 мм у середній частині. Така величина деформації є критичною для тонкостінних елементів, оскільки суттєво перевищує допустимі технологічні відхилення і фактично робить обробку або подальше складання неможливими без рихтування. Причина цього полягає у поєднанні великої поздовжньої усадки (приблизно 58,8 кН), значного ексцентриситету дії усадкової сили (21,5 мм) та малої жорсткості перерізу елемента, яка напряму залежить від значення товщини (4 мм).

У подібних випадках фіксувальні елементи є ключовим засобом зниження деформацій, оскільки вони змінюють граничні умови та частково сприймають дію усадкових сил. Встановлення кінцевих затискачів або притискних планок дозволяє суттєво зменшити ефективну довжину прогону та створити реакційні моменти, що знижують амплітуду прогину в рази. Використання розподілених опор під усією довжиною штабика ще більш ефективне: такі опори збільшують загальну згинальну жорсткість системи та практично виключають можливість значного прогину. Локальні роликові або планкові притиски, розташовані безпосередньо біля зони наплавлення, зменшують ексцентриситет усадочної дії та перешкоджають локальному вигину в найбільш вразливій зоні; вони забезпечують додаткове

вирівнювання, хоча й не можуть повністю замінити кінцеві опори.

Окремим ефективним засобом є попередній «зворотний» вигин елемента, коли перед наплавленням заготовки надають форму, протилежну очікуваній деформації. Після охолодження та релаксації залишкові напруження вирівнюють деталь до близького до плоского стану. Такий метод вимагає ретельного підбору величини попереднього вигину, але добре зарекомендував себе в технологічних процесах зварювання тонких сталевих елементів. Додаткові конструктивні рішення, такі як застосування формувальних канавок або теплопровідних підкладок, дозволяють керувати локальним розподілом деформацій та температурних градієнтів, підсилюючи ефективність фіксувальних елементів.

Виходячи з результатів розрахунку, наплавлення по відкритому краю листа товщиною 4 мм при зазначених режимах без спеціальних конструктивних заходів практично неможливе: деформації стають некерованими та перевищують допустимий технологічний рівень. Це підтверджує необхідність застосування притискних роликів, формувальної канавки, примусового охолодження та інших елементів, здатних стабілізувати геометрію деталі, розподіл тепла та обмежити пластичні деформації під час процесу наплавлення.

Запропонований пристрій (рис. 3) включає станину з мідною примусово охолоджувальною основою 1, індукційний нагрівач 6 та систему контактних роликів притискачів 10 та 12. У станині виконана формувальна канавка 4, що забезпечує напрямлену деформацію кромки тонкостінної деталі в процесі наплавлення. Це дозволяє компенсувати локальні теплові напруження та запобігати викривленню. На станині встановлено обмежувальну камеру 7 з вирізом для дії джерела нагріву. Камера має можливість регулювання положення у площині, перпендикулярній до осі переміщення деталі, що дозволяє адаптувати пристрій до різної товщини заготовок і концентрувати тепловий потік лише у зоні наплавлення. Контактні роликові притискачі розташовано симетрично з обох боків зони дії індуктора. Вхідний притискач має конічну форму та орієнтований під кутом $10...15^\circ$ до поперечної площини деталі. Такий нахил забезпечує попереднє прилягання та стабілізацію положення заготовки, посилює теплообмін з водоохолоджувальною основою 6 та знижує ризик прогину. Вихідний притискач циліндричної форми підтримує рівномірність тиску та сприяє формуванню гладкої поверхні наплавлення.

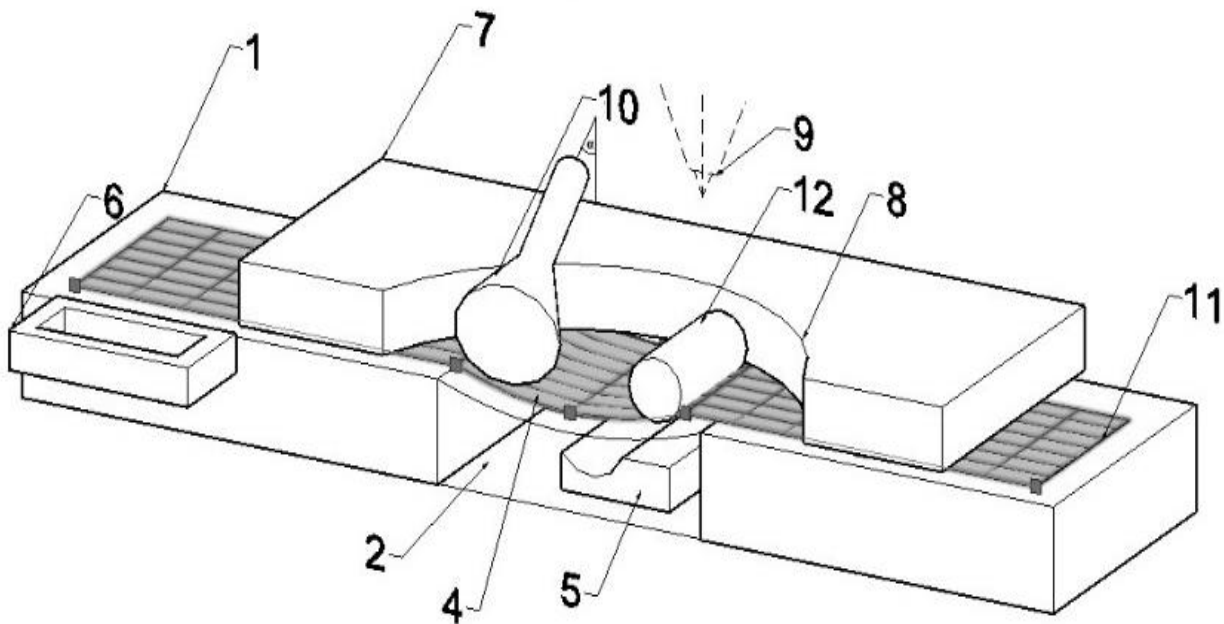


Рис. 3 — Схема пристрою для наплавлення плоских тонкостінних деталей (рух заготовки — зліва направо)

Під час роботи деталь фіксується між станиною та обмежувальною камерою. Після попереднього підігріву індуктором відбувається наплавлення по кромці. Притискачі компенсують усадкові напруження, а система примусового охолодження відводить надлишкове тепло. Формувальна канавка забезпечує контроль геометрії під дією оброблюваної пластини.

При напавленні тіл обертання додатковою технологічною проблемою є заварювання кратера наприкінці колового проходу. Внаслідок циклічного теплового навантаження та неможливості природного «виходу» шва за межі деталі в зоні замикання траєкторії формується локальне перевищення тепловкладення, що призводить до утворення усадкової раковини,

порушення структури наплавленого металу або локального жолоблення кромки. Імовірним шляхом вирішення цієї проблеми є застосування керованих перехідних режимів: поступове зниження теплової потужності джерела, введення перекривного допоміжного валика або використання тимчасової технологічної вставки, на яку переноситься зона завершення процесу.

Висновки

1. Встановлено, що специфічні умови експлуатації та мала жорсткість тонкостінних деталей (3...5 мм) роблять їх вразливими до значних температурних деформацій під час наплавлення. Розрахунки підтвердили, що без належної фіксації виникає поздовжня усадочна сила (~58,8 кН), яка призводить до неприйнятного прогину (23...25 мм), а існуючі методи теплового регулювання не забезпечують необхідної геометричної стабільності.

2. Розроблено комбінований пристрій, що включає формувальну канавку, систему роликів притискувачів та водоохолоджувачу основу. Таке поєднання дозволяє керувати тепловим циклом, зменшити ексцентриситет усадкових сил та змінити умови закріплення, що забезпечує збереження геометрії деталі без необхідності подальшого механічного рихтування.

Перелік використаних джерел

- [1] Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels / Jafari A., Dehghani K., Bahaaddini K., Abbasi Hataie R. *Wear*. 2018. Vol. 416–417. Pp. 14–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.09.010>.
- [2] Wahlström J., Olander L., Olofsson U. Size, shape, and elemental composition of airborne wear particles from disc brake materials. *Tribology Letters*. 2010. Vol. 38, no. 1. Pp. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9564-X>.
- [3] Mosleh M., Blau P. J., Dumitrescu D. Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials. *Wear*. 2004. Vol. 256, no. 11-12. Pp. 1128–1134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.07.007>.
- [4] Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions / R. Cai et al. *Wear*. 2020. Vol. 452-453. Article 203283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203283>.
- [5] Blau P. J., Meyer H. M. Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials. *Wear*. 2003. Vol. 255, no. 7-12. Pp. 1261–1269. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(03\)00111-x](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(03)00111-x).
- [6] MIG Welding Techniques and Tips. Available: <https://www.mig-welding.co.uk/finishing/secondary-grinding.jpg>. Accessed on: December 15, 2025.
- [7] Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding / Xiong J., Li R., Lei Y., Chen H. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 251. Pp. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007>.
- [8] An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts / J. Du et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 234. Pp. 332–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.005>.
- [9] Effect of temperature on milling stability of thin-walled parts / Y. Liu et al. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2022. Pp. 17. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544054221101752>.
- [10] Feng M., Wang Y. C., Davies J. M. Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire. *Fire Safety Journal*. 2003. Vol. 38, no. 4. Pp. 365–394. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(02\)00090-5](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(02)00090-5).
- [11] Xiong J., Lei Y., Li R. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 126. Pp. 43–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168>.
- [12] Пристрій для наплавлення тонкостінних деталей : пат. 93288 Україна : B23K13/00. № а200905554; заявл. 01.06.2009; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 23/2010.
- [13] Пристрій для наплавлення плоских тонкостінних деталей : пат. 55346 Україна : B23K13/00. № 3882277; заявл. 15.04.1985; опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3/2003.
- [14] Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків : пат. 152210 Україна : B23K13/00, B23K101/00. № u202200783; заявл. 21.02.2022; опубл. 05.01.2023. Бюл. № 1/2023.
- [15] Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків : пат. 59994 Україна : B23K13/00. № u201013152; заявл. 05.11.2010; опубл. 10.06.2011. Бюл. № 11/2011.
- [16] Прохоренко В., Прохоренко О. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях : навч. посіб. Київ : НТТУ «КПІ», 2009. 267 с.

STABILIZATION OF THE EDGE CONFIGURATION OF THIN-WALLED PARTS DURING THEIR FUSIONING OR BUTT WELDING

Peremitko V.V.	D.Sc. (Engineering), professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9032-6116 , e-mail: vperemitko1965@gmail.com ;
Kolomoyets I.V.	PhD, associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3650-2929 , e-mail: ikolomoyets94@gmail.com ;
Nosov D.G.	PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1588-684X , e-mail: nosov_dstu@ukr.net ;
Chumak M.S.	postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske;
Davydyuk A.V.	PhD, associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3688-3455 , e-mail: anzhela8848@gmail.com

This work is devoted to a comprehensive consideration of the problem of ensuring geometric stability and a significant increase in the service life of thin-walled metal parts during surfacing or edge welding operations. The study found that such structural elements are characterized by a critical combination of intense thermal deformations, high residual stresses and accelerated abrasive or fatigue wear. These factors together create severe limitations for the implementation of traditional surfacing technologies, since the thermal welding cycle leads to an irreversible loss of shape accuracy. The work analyzes in detail the specific operating conditions of thin-walled parts, reveals the dominant mechanisms of their destruction, and also systematizes existing design and technological solutions aimed at minimizing welding deformations. Particular attention is paid to calculating the potential deflection of a part made of 9HF steel with a thickness of 4 mm during surfacing in MIG/MAG modes. Theoretical calculations and experimental data show that in the absence of rigid fixation and thermal control, the residual deflection can reach 23...25 mm. This level of deformation is technologically unacceptable, since it makes further mechanical processing and operation of the product impossible. To solve this problem, the author's design of a specialized device for surfacing is proposed. It is based on the synergy of three components: a forming groove, a system of contact roller clamps and a copper base with forced liquid cooling. It is scientifically substantiated that such a combination allows you to effectively change the boundary conditions of fastening, minimize the eccentricity of the action of shrinkage forces, stabilize the general temperature regime of the heat-affected zone and radically reduce the level of grooving. At the end of the work, scientific hypotheses are formulated regarding the adaptation of the developed device for surfacing thin-walled bodies of rotation, in particular industrial disk knives. At the same time, specific requirements for dynamic balancing of the tool were taken into account and the problem of high-quality crater welding was solved, which is critical for ensuring the durability of the cutting edge.

Keywords: thin-walled parts; surfacing along the edge; residual stresses; thermal deformations; deflection; roller clamps; forming groove; forced cooling; bodies of rotation; disk knives.

References

- [1] A. Jafari, K. Dehghani, K. Bahaaddini, and R. Abbasi Hataie, "Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels," *Wear*, vol. 416–417, pp. 14–26, 2018. doi: [10.1016/j.wear.2018.09.002](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.09.002).
- [2] J. Wahlström, L. Olander, and U. Olofsson, "Size, shape, and elemental composition of airborne wear particles from disc brake materials," *Tribology Letters*, vol. 38, no. 1, pp. 15–24, 2010. doi: [10.1007/s11249-009-9564-X](https://doi.org/10.1007/s11249-009-9564-X).
- [3] M. Mosleh, P. J. Blau, and D. Dumitrescu, "Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials," *Wear*, vol. 256, no. 11–12, pp. 1128–1134, 2004. doi: [10.1016/j.wear.2003.07.007](https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.07.007).
- [4] R. Cai, J. Zhang, X. Nie, J. Tjong, and D.T.A. Matthews, "Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions," *Wear*, vol. 452–453, 2020, article 203283. doi: [10.1016/j.wear.2020.203283](https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203283).
- [5] P. J. Blau, and H. M. Meyer, "Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials," *Wear*, vol. 255, no. 7–12, pp. 1261–1269, 2003. doi: [10.1016/S0043-1648\(03\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00111-X).
- [6] MIG Welding Techniques and Tips. [Online]. Available: <https://www.mig-welding.co.uk/finishing/secondary-grinding.jpg>. Accessed on: December 15, 2025.
- [7] J. Xiong, R. Li, Y. Lei, and H. Chen, "Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 251, pp. 12–19, 2018. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007).
- [8] J. Du, Z. Wei, X. Wang, J. Wang, and Z. Chen, "An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 234, pp. 332–341, 2016. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.005).

- [9] X. Xu, B. Li, and L. Zhou, "Effect of temperature on milling stability of thin-walled parts," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2258, no. 1, article 012015, 2022. doi: **10.1177/09544054221101752**.
- [10] M. Feng, Y. C. Wang, and J. M. Davies, "Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire," *Fire Safety Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 365–394, 2003. doi: **10.1016/s0379-7112(02)00090-5**.
- [11] J. Xiong, Y. Lei, and R. Li, "Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, pp. 43–52, Nov. 2017. [Online]. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168**.
- [12] O. M. Shablii, "Device for surfacing thin-walled parts," UA Patent 93288, Jan. 25, 2011. (Ukr.)
- [13] C. V. Pulka, and O. M. Shablii, "Device for facing of thin wall parts," UA Patent 55346, Mar. 17, 2003. (Ukr.)
- [14] C. V. Pulka, "Device for surfacing thin shaped disks," UA Patent 152210, Jan. 4, 2023. (Ukr.)
- [15] C. V. Pulka, "Device for surfacing of thin shaped disks," UA Patent 59994, Jun. 10, 2011. [Online]. (Ukr.)
- [16] V. Prokhorenko, and O. Prokhorenko, *Napruzhennia ta deformatsii u zvarnykh ziednanniakh i konstruktsiakh* [Stresses and Deformations in Welded Joints and Structures: Textbook]. Kyiv, Ukraine: NTTU «KPI» Publ., 2009. (Ukr.)

Стаття надійшла 06.02.2026

Стаття прийнята 25.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Стабілізація конфігурації кромки тонкостінних деталей при їх наплавленні або зварюванні по торцю / В.В. Перемітько та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 137–144. DOI: [10.31498/2225-6733.53.1.2026.359795](https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359795).

132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.785

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359798

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ БОРУВАННЯ НА СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ**Бармін О.Є.**канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>, e-mail: axel.com.ua@gmail.com;**Григор'єва С.В.**інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>, e-mail: kapuchinka84@gmail.com

У статті розглянуто закономірності формування боридних шарів на сталі 45 при боруванні в порошкових сумішах, досліджено вплив температури та тривалості насичення на структуру, мікротвердість і кінетику росту шару. **Мета.** Метою роботи є встановлення кількісних закономірностей формування боридних шарів на конструкційній сталі 45, дослідження впливу температури та тривалості насичення на структуру і мікротвердість шару, розроблення математичної моделі прогнозування товщини боридного шару залежно від параметрів процесу. **Методика.** Зразки зі сталі 45 піддавали боруванню в герметичних контейнерах у суміші карбіду бору, фторборату калію та оксиду алюмінію при температурах 850, 900 і 950°C з витримкою 4, 6 та 8 годин; товщину шару визначали за результатами не менше 50 вимірювань на зразок. Кінетику росту описували параболічним законом дифузії, температурну залежність – рівнянням Арреніуса. Статистичну обробку виконували методами дисперсійного та регресійного аналізу в рамках методології поверхні відгуку. **Результати.** Боркування формує боридний шар з пилкоподібною морфологією. Товщина шару зростає від 102 до 308 мкм зі збільшенням температури та часу витримки. Визначено енергію активації дифузії бору – 193,0 кДж/моль та частотний фактор – $6,69 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Мікротвердість боридної зони становить 16–20 ГПа і визначається фазовим складом, а не режимами обробки. Регресійна модель другого порядку описує товщину шару зі скоригованим коефіцієнтом детермінації 0,9904. **Наукова новизна.** Вперше для сталі 45 отримано повний комплекс кінетичних параметрів дифузії бору та розроблено регресійну модель, яка кількісно зв'язує товщину боридного шару з температурою та тривалістю обробки з точністю апроксимації 99,04%. **Практична значимість.** Модель є готовим інженерним інструментом для розрахунку режимів борування сталі 45 без додаткових дорогих експериментів і може бути застосовна при виробництві зносостійких деталей без переходу на дорожчі матеріали.

Ключові слова: борування; боридний шар; кінетика росту; енергія активації; мікроструктура; регресійна модель.

Постановка проблеми

Забезпечення тривалої роботи машинних компонентів, що функціонують за умов інтенсивного тертя, ударних навантажень та контакту з корозійно-активними середовищами, є однією з ключових проблем машинобудування.

Сталі середньовуглецевого класу (вміст вуглецю від 0,25% до 0,6%), завдяки оптимальному поєднанню міцності, пластичності та технологічності, набули широкого застосування у виробництві відповідальних деталей: валів, осей, шестерень, штоків, шпинделів, втулок і кріпильних елементів. Проте відносно невисока твердість їхньої поверхні у вихідному стані робить такі деталі схильними до інтенсивного абразивного зношування, особливо при роботі без мастила або в середовищах, що містять абразивні частинки. Низька зносостійкість поверхневого шару нерідко виступає вирішальним обмеженням загального ресурсу деталі та довговічності всього вузла.

Перспективним способом вирішення цієї проблеми є хіміко-термічна обробка, яка дає змогу суттєво поліпшити властивості поверхневого шару, при цьому

зберігається в'язка серцевина. Особливе місце серед таких методів займає борування: воно забезпечує формування надзвичайно твердих шарів боридів заліза (FeB, Fe₂B) з твердістю до 20 ГПа. Такі шари не лише радикально підвищують зносостійкість поверхні, жаростійкість, але й забезпечують стійкість до корозії в ряді агресивних середовищ, у тому числі в розплавах деяких металів [1-4]. Отже, насичення бором поверхні конструкційних середньовуглецевих сталей дозволить без переходу на дорожчі матеріали значно підвищити довговічність широко застосовуваних деталей.

Проте ефективне використання процесу в промислових масштабах неможливе без встановлення кількісних співвідношень між режимами обробки і параметрами сформованого дифузійного шару, насамперед його товщиною та мікроструктурою. Наявність таких залежностей дозволить обґрунтовано призначати технологічні параметри процесу (температуру, час витримки), щоб досягти потрібних експлуатаційних властивостей, скорочуючи витрати та мінімізуючи деформацію деталей. Саме в отриманні подібних кількісних

даних стосовно конкретної, масово вживаної сталі 45 і полягає актуальність цього дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наукової літератури свідчить про те, що загальна феноменологія борування сталей на сьогодні охарактеризована досить детально, однак дослідницький інтерес традиційно зосереджений переважно на інструментальних та легованих марках.

Дифузійне зростання боридних шарів підпорядковується параболичному закону, який безпосередньо впливає з другого закону Фіка і підтверджений у численних роботах для широкого кола матеріалів. У практиці досліджень характер взаємозв'язку коефіцієнта дифузії та температури традиційно описується за допомогою рівняння Арреніуса: зокрема, в роботах [5, 6] цей підхід використовувався при дослідженні кінетики борування сталей AISI H13 та AISI P20 відповідно. Розкид значень енергії активації, що наводяться різними дослідниками, може бути досить значним внаслідок відмінностей у методах проведення експериментів, хімічних складів насичуючого середовища та сталі. Наприклад, автори роботи [1] для сталі AISI 1045 отримали значення енергії активації 186,0 кДж/моль, а в роботі [7] для армко-заліза значення складала 157 кДж/моль, що відображає загальну закономірність: чим вищий вміст вуглецю, тим більший енергетичний бар'єр дифузії.

Наявні наукові праці переконливо свідчать про експоненційну залежність коефіцієнта дифузії та товщини дифузійного шару від температури, натомість залежність від часу має параболичний характер. Як показано в роботах [8, 9], температурний фактор суттєво переважає за своїм впливом тривалість витримки. Проте кількісне співвідношення цих ефектів може змінюватися залежно від хімічного складу сталі.

Щодо морфології та структури боридного шару на середньовуглецевих сталях, добре встановленим є факт формування вираженої пилкоподібної (зубчастої) морфології. В основі цього явища лежить анізотропія дифузійних процесів і швидкості росту залежно від кристалографічного напрямку. Відповідно до результатів, представлених у роботах [10, 11], така морфологія сприяє надійній механічній адгезії боридного шару до основи завдяки ефекту геометричного зчеплення за типом.

Останніми роками для моделювання та підвищення ефективності різноманітних технологічних процесів дедалі частіше звертаються до статистичних методів обробки даних. Так, у роботі [12] для прогнозування товщини боридного шару на чавуні було залучено регресійний аналіз, а методологія поверхні відгуку в роботі [13] була спрямована на оптимізацію твердості покриття. Подібні методи дають змогу

отримувати високоточні емпіричні моделі в рамках планованого експерименту.

Таким чином, попри те, що узагальнені закономірності насичення бором достатньо вивчені, для сталі 45 досі не сформовано комплексу даних, який би поєднував результати статистично спланованого експерименту, кінетичний аналіз з обчисленням кінетичних параметрів Q та D_0 , статистичну оцінку впливу технологічних факторів і практичну регресійну модель прогнозування товщини боридного шару.

Мета статті

Робота має на меті визначення особливостей формування боридних шарів на сталі 45 в умовах борування в порошкових сумішах, вивчення впливу температурного режиму та часу насичення на структурні характеристики, мікротвердість і кінетичні закономірності росту шару, а також розроблення математичної моделі для прогнозування товщини дифузійного шару залежно від умов проведення насичення.

Матеріали та методи

Як об'єкт для вивчення кінетики росту боридних шарів використовувалась середньовуглецева конструкційна сталь 45, елементний склад наведено в таблиці 1.

Сталь 45 випускається у вигляді листів, фасонного прокату та поковок і використовується для виготовлення колінчастих валів, шестерень, осей, болтів, гайок та інших деталей, що працюють в умовах середніх механічних навантажень. Підвищення експлуатаційних властивостей досягається термічною обробкою – загартуванням з відпуском або методами поверхневого зміцнення.

Низький вміст легувальних елементів та домішок створює умови дослідження безпосереднього ефекту дифузії бору, виключаючи вплив карбідоутворюючих та нітридоутворюючих компонентів.

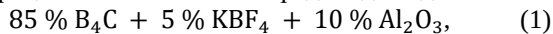
Для виготовлення зразків використовувався прокат зі сталі 45, зразки мали форму циліндра з поперечним перерізом 15 мм та висотою 10 мм. Підготовку поверхонь проводили шліфуванням наждачним папером із фінішною зернистістю P800, промивали в етиловому спирті з метою знежирення та піддавали сушінню. Зазначена підготовка поверхні забезпечує низький рівень шорсткості ($R_a \leq 0,2$ мкм) та перешкоджає утворенню оксидних плівок, які негативно впливають на активність процесу насичення. Підготовлені зразки поміщали у герметичні контейнери та засипали шаром (~20 мм) порошкової насичуючої суміші. Для запобігання витоку газів, що виникають в ході реакції між активатором та борвмісними складовими суміші, контейнери надійно герметизували.

Таблиця 1

Елементний склад сталі 45

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Вміст, %	0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	≤ 0,030	≤ 0,035	≤ 0,25	≤ 0,3	≤ 0,3	Решта

Співвідношення компонентів порошкової суміші було визначено на підставі аналізу літературних даних та напрацювання власних попередніх досліджень:



B_4C – основний постачальник бору;

KBF_4 – активатор, який прискорює перебіг реакції шляхом утворення легких борвмісних сполук;

Al_2O_3 – інертний наповнювач, що забезпечує стабільність суміші та перешкоджає її спіканню.

Відповідно до літературних даних [14], активуючі компоненти порошкової суміші типу KBF_4 підвищують парціальний тиск бору безпосередньо біля металеві поверхні, що підвищує інтенсивність процесу насичення та сприяє рівномірності шару.

По завершенні борування металографічну підготовку зразків здійснювали відповідно до стандартної методики, яка включала послідовне шліфування із застосуванням наждачного паперу зростаючих номерів зернистості, полірування на сукняному крузі із полірувальною пастою на основі Cr_2O_3 та завершальне хімічне травлення 4% спиртовим розчином HNO_3 для виявлення елементів мікроструктури. Мікроструктурний аналіз та фотографування здійснювали на стаціонарному металографічному мікроскопі ZEISS Axio Vert.A1 із застосуванням цифрової фіксації зображень; оптимальне збільшення визначали з умови забезпечення достовірної ідентифікації та зіставлення структурних складових незалежно від ступеня їх дисперсності.

Для визначення товщини дифузійного шару застосовували метод середньої лінії, який широко застосовується для шарів з нерівномірним пилкоподібним профілем границі розділу. На кожному зразку виконували не менше 50 вимірювань відстані від поверхні зразка до вершин найглибших пилкоподібних виступів боридного шару, а їх усереднене арифметичне значення вважали ефективною товщиною шару (d_{ef}). Вимірювання мікротвердості здійснювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях 10–200 г з витримкою під навантаженням 7–10 секунд.

Для опису кінетики росту дифузійного шару застосовували параболічний закон, який є характерним для дифузійно-контрольованих процесів [1, 6, 8]:

$$d^2 = D \cdot t, \quad (2)$$

де d – товщина дифузійного шару (м),

D – коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$),

t – час витримки при дифузії (с).

Таким чином, між товщиною дифузійного шару та квадратним коренем часу встановлюється лінійна залежність:

$$d = \sqrt{D \cdot t}. \quad (3)$$

Для опису зв'язку між коефіцієнтом дифузії D та абсолютною температурою T використовують

рівняння Арреніуса [1, 6, 8]:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (4)$$

де D_0 – коефіцієнт частоти (передекспоненційний коефіцієнт), що залежить насамперед від типу кристалічної решітки, а також від величини атомного стрибка та частоти коливань дифузного атома, $\text{м}^2/\text{с}$;

R – універсальна газова константа, Дж/(моль·К);

Q – енергія активації (мінімальна енергія, необхідна для здійснення дифузійного стрибка), Дж/моль.

Логарифмічне перетворення рівняння (4) дає лінійну форму запису:

$$\ln D = \ln D_0 - \left(\frac{Q}{R}\right) \cdot \frac{1}{T}. \quad (5)$$

Відповідно, аналіз графіка залежності $\ln D$ від $1/T$ дає змогу визначення Q за нахилом прямої та $\ln D_0$ за відрізком, що відсікається нею на осі ординат.

Статистичний аналіз отриманих даних виконували у програмному пакеті TIBCO Statistica. З метою встановлення впливу температурного режиму та тривалості витримки на товщину боридного шару застосовували метод дисперсійного аналізу (ANOVA) із перевіркою значимості факторних ефектів відповідно до F-критерію та р-значенням.

Ступінь впливу кожного фактора визначали через показник часткового ета-квадрату (η^2), що відображає відносний внесок у дисперсію залежної змінної, яку пояснює відповідний фактор. Для побудови прогнозної моделі використовували регресійний аналіз у рамках статистичної методології поверхні відгуку (Response Surface Methodology) з урахуванням квадратичних членів і парної взаємодії факторів; ступінь відповідності моделі даним оцінювали за допомогою скоригованого коефіцієнта детермінації (R^2_{adj}).

Виклад основного матеріалу

Результати металографічного аналізу свідчать, що насичення бором сталі 45 порошковим методом у температурному діапазоні 850–950°C приводить до формування явно вираженого боридного шару (рис. 1). У всіх випадках боридна зона складається з боридів FeB , Fe_2B та має виражену зубчасту структуру з характерним пилкоподібним профілем границі розділу. У міру зростання температури та тривалості процесу насичення морфологія боридів зазнає характерної трансформації – від тонкоголчастої до щільнішої пластинчастої будови, притаманної тривалішим процесам. Переважний ріст голок спостерігається вздовж границь зерен, що корелює з підвищеною швидкістю зернограничної дифузії бору.

Подібна морфологія сприятливо позначається на адгезії шару до основи завдяки ефекту механічного закріплення за типом «ластівчиного хвоста» [10, 11].

Встановлено, що підвищення температури та тривалості борування закономірно збільшує товщину боридного шару при цьому температурний фактор є значно вагомішим: при зростанні температури з 850°C до 950°C товщина шару зростає більш як удвічі.

Безпосередньо під боридним шаром простежується перехідна зона, представлена феритом і перлітом з підвищеним вмістом останнього порівняно з серцевиною. Такий розподіл є наслідком інтенсивних дифузійних процесів, що спричиняють витіснення атомів вуглецю з поверхневих шарів углиб матеріалу та стимулюють утворення додаткового цементиту. Оскільки вміст вуглецю в сталі 45 є відносно невисоким, це зумовлює повільне формування бар'єрного карбідного шару, який не може достатньо ефективно компенсувати анізотропію росту боридів, внаслідок чого зубці ростуть вглиб металу, утворюючи характерну нерівномірну морфологію.

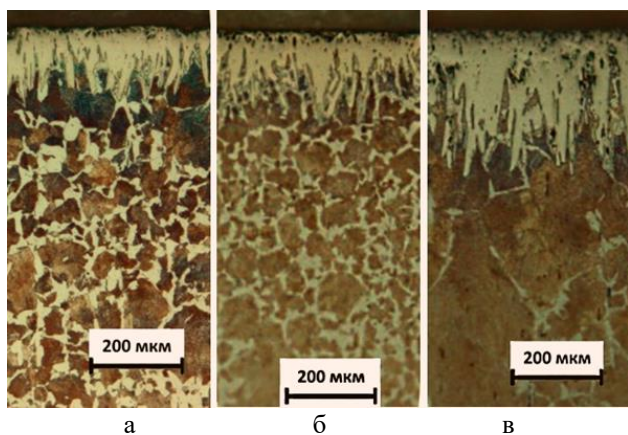


Рис. 1 – Мікроструктура боридного шару на сталі 45 після насичення в різних режимах: а) 850°C, 4 години; б) 850°C, 8 годин; в) 950°C, 4 години

В таблиці 2 наведено результати експериментальних досліджень, що характеризують середню товщину боридного шару, сформованого на сталі 45 в залежності від параметрів режиму насичення.

Таблиця 2
Середні виміряні значення товщини боридного шару на сталі 45, мкм

Температура борування, °C	Час борування, год		
	4	6	8
850	102	120	132
900	150	196	221
950	231	285	308

Аналіз даних таблиці показав, що температура відіграє домінуючу роль у формуванні товщини боридного шару: зі зростанням температури з 850°C до 950°C спричиняє збільшення її значення більш як удвічі. Зокрема, при витримці протягом 4 годин при

температурі 850°C формується шар товщиною близько 102 мкм, тоді як при 950°C – вже близько 231 мкм. Збільшення тривалості обробки також сприяє зростанню товщини шару, однак цей вплив є менш інтенсивним і має нелінійний характер. Зокрема, при 900°C подовження витримки з 4 до 6 годин дає помітний приріст товщини (~ 46 мкм), тоді як подальше збільшення до 8 годин забезпечує лише незначний приріст (~ 25 мкм). Це може свідчити про поступове зниження активності борвмісних складових насичуючого середовища або про сповільнення дифузійного процесу через збагачення приповерхневої зони вуглецем.

Для підтвердження параболического характеру росту боридного шару було побудовано графіки залежності товщини шару (d) від $\sqrt{t}$ для всіх трьох температур експерименту (рис. 2а). Лінійний характер залежності, виявлений при кожній із трьох температур, підтверджує об'ємно-дифузійний механізм контролю процесу згідно з рівнянням (2). Значення коефіцієнта дифузії бору D в сталі 45 для кожної температури було розраховано з нахилів відповідних прямих.

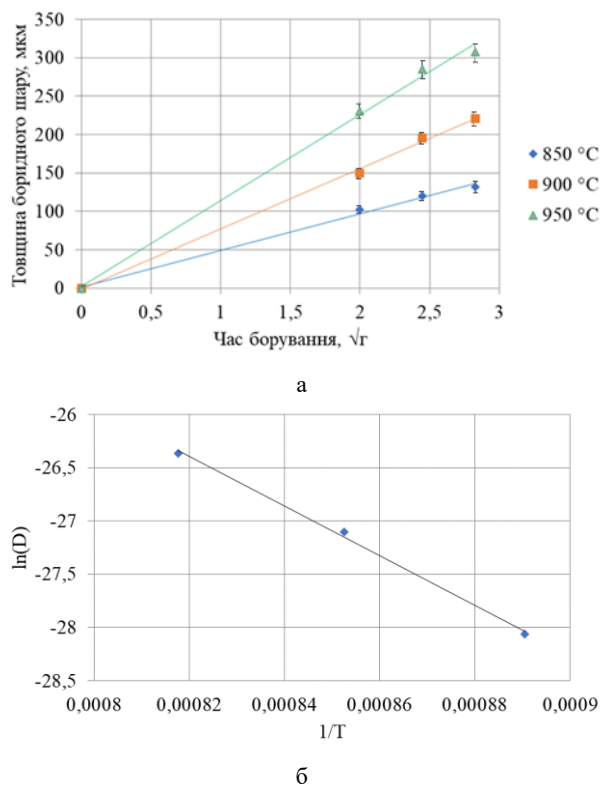


Рис. 2 – Кінетичні закономірності росту боридного шару на сталі 45: а) лінійна залежність ефективної товщини шару від кореня квадратного з часу борування; б) залежність натурального логарифма коефіцієнта дифузії від величини, оберненої до абсолютної температури

На наступному етапі було побудовано графік Арреніуса: натуральний логарифм коефіцієнта дифузії $\ln D$ як функція оберненої температури $1/T$ (рис. 2б).

З наведеного графіка видно, що експериментальні дані добре узгоджуються з прямолінійною залежністю, підтверджуючи застосовність рівняння Арреніуса для характеристики температурної залежності борування. За тангенсом кута нахилу прямої та відрізком, що відсікається нею на осі ординат, визначено:

- енергія активації дифузії бору,

$Q = 193,0$ кДж/моль

- коефіцієнт частоти, $D_0 = 6,69 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

Розраховане значення енергії активації дифузії бору в сталі 45 корелює з відомими літературними даними для середньовуглецевих сталей подібного складу (табл. 3).

Таблиця 3

Зіставлення значень енергій активації

Матеріал	Середовище борування	Енергія активації, кДж/моль	Посилання
AISI 1040	порошкова суміш	168,0	[15]
AISI 1045	порошкова суміш	186,0	[1]
Армко-залізо	паста	157,0	[7]
Сталь 45	порошкова суміш	193,0	це дослідження

Більш високе значення енергії активації для сталі 45 відносно чистого заліза пояснюється впливом вуглецю та супутніх елементів (Si, Mn), що ускладнює дифузійне переміщення атомів бору та збільшує відповідний енергетичний бар'єр.

Передекспоненційний множник D_0 характеризує частоту атомних коливань, які завершуються успішним дифузійним переходом. Підвищення значення D_0 сприяє збільшенню коефіцієнта дифузії.

Для статистичного аналізу експериментальних результатів у даній роботі було залучено методи дисперсійного та регресійного аналізу. Дисперсійний аналіз застосовували для з'ясування природи варіювання товщини боридного шару – випадкової чи зумовленої впливом температури та тривалості борування як незалежних змінних. Результати ANOVA (табл. 4) засвідчили статистичну значущість обох досліджуваних змінних ($p < 0,05$).

Величину впливу кожної змінної в дисперсійному аналізі оцінювали за допомогою часткового ета-квадрату (η^2) – показника, що відображає частку загальної дисперсії, зумовлену відповідним ефектом. Розраховані значення цього показника для температури та тривалості насичення дорівнюють 0,9812 та 0,8854 відповідно, що свідчить про значно більший вплив температурного фактора. Це закономірно узгоджується з фізичною природою дифузійного процесу, де температура відіграє визначальну роль через експоненційний характер залежності, описуваної рівнянням Арреніуса.

Таблиця 4

Зіставлення значень енергій активації

Ефект	Сума квадратів відхилень SS	Ступені свободи df	Середній квадрат MS	Критерій Фішера F -значення	Рівень значущості p -значення	Частковий ета-квадрат η^2
Вільний член	338336,1	1	338336,1	1913,906	0,000002	0,9979
Температура	36924,2	2	18462,1	104,4372	0,000353	0,9812
Тривалість	5467,6	2	2733,8	15,464	0,01311	0,8854
Помилка	707,1	4	176,8			

З технологічної точки зору наведений висновок свідчить про те, що для прискореного нарощування боридного шару на сталі 45 підвищення температури є пріоритетнішим заходом, ніж збільшення тривалості борування, хоча останнє також суттєво впливає на товщину шару.

З метою встановлення функціональної залежності між змінними було виконано регресійний аналіз. Такий підхід широко використовується для побудови емпіричних моделей, що описують поведінку матеріалів та інженерних процесів, і дозволяє визначити оптимальне поєднання входних параметрів для отримання необхідних властивостей. Регресійні моделі є ефективним інструментом побудови емпіричних залежностей у матеріалознавстві та інженерній практиці, оскільки дають змогу визначати оптимальні значення входних параметрів для отримання заданих характеристик матеріалу.

За результатами обробки експериментальних даних отримано емпіричну регресійну модель другого порядку, що описує залежність товщини боридного шару (d , мкм) на сталі 45 від температури (t , °C) та тривалості борування (τ , год) – рівняння 6.

$$d = 1619,9443 - 4,4183 \cdot t - 61,9167 \cdot \tau + 0,0029 \cdot t^2 - 2,4167 \cdot \tau^2 + 0,1175 \cdot t \cdot \tau \quad (6)$$

Значення скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2_{adj} = 0,9904$ вказує на те, що розроблена модель охоплює 99,04% варіації товщини боридного шару в досліджуваному діапазоні умов борування, що є переконливим свідченням її точності та адекватності експериментальним даним.

Графічна візуалізація у вигляді тривимірної поверхні відгуку (рис. 3) є наочним підтвердженням експоненційної залежності товщини боридного шару від температури та параболічної – від часу борування.

Розподіл мікротвердості за перерізом зразків сталі 45, що пройшли борування при трьох різних температурах з тривалістю витримки 4 години, наведено на рисунку 4.

Отриманий профіль твердості наочно відображає зональну будову поверхневого шару. У границях боридної зони мікротвердість змінюється від ~20 ГПа на зовнішній поверхні до ~16 ГПа на її внутрішній границі. Максимальне значення твердості (~20 ГПа) властиве зовнішньому шару боридної зони, утвореному фазою FeB, тоді як внутрішня частина, представлена фазою Fe₂B, демонструє дещо нижчий рівень твердості – близько 16 ГПа.

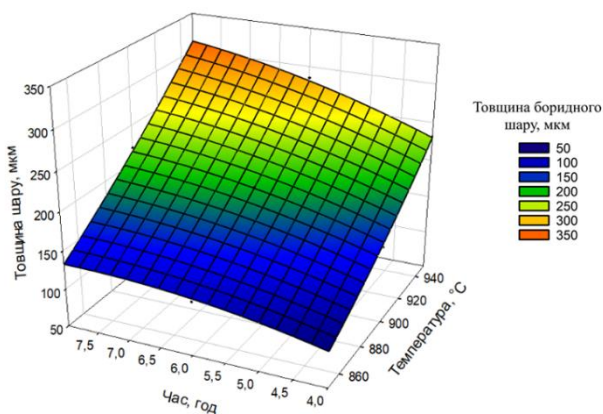


Рис. 3 – Графічне зображення поверхні відгуку для регресійного рівняння товщини боридного шару

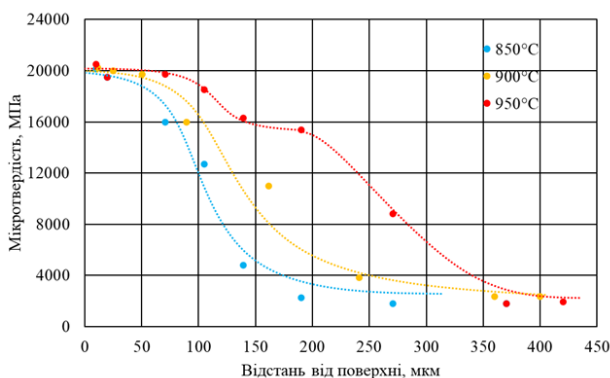


Рис. 4 – Розподіл мікротвердості по товщині боридного шару сталі 45 (борування протягом 4 години)

За границею боридного шару, у напрямку до серцевини матеріалу, твердість різко знижується. Ця ділянка відповідає перехідній зоні зі зменшеною концентрацією бору, де присутній лише його твердий розчин у залізі, а також спостерігається підвищений вміст вуглецю, витісненого з поверхні в процесі борування. Падіння твердості в цій зоні відбувається стрімко: вже на глибини 20–50 мкм від границі боридної зони вона знижується з приблизно 16 ГПа до 5–6 ГПа. У зоні 200–300 мкм від поверхні (залежно від температурного режиму борування) твердість виходить на рівень,

характерний для сталі 45 після нагріву та наступного охолодження на повітрі.

Порівняльний аналіз профілів мікротвердості для зразків, оброблених при різних температурах, виявляє спільну тенденцію: поверхнева твердість у боридній зоні залишається практично незмінною незалежно від температурно-часових параметрів борування. Зазначене свідчить про те, що на мікротвердість боридної зони середньовуглецевих сталей не справляють суттєвого впливу ні температурний режим, ні тривалість борування. Цей факт свідчить про те, що для сталей типу сталі 45 визначальним чинником мікротвердості боридної зони є її фазовий склад (FeB/Fe₂B), а не режим обробки.

Результати та їх обговорення

Отримані в ході дослідження результати дозволяють зробити низку важливих узагальнень щодо фізичних механізмів формування боридних шарів на сталі 45 та їх практичного значення.

Підтвердження параболічного закону кінетики росту боридного шару свідчить про те, що визначальним механізмом процесу є об'ємна дифузія бору крізь вже сформований шар, а не реакція на границі розподілу або дифузія по поверхні. Це узгоджується з класичною теорією дифузійного росту фаз і підтверджується лінійністю залежності товщини шару від квадратного кореня часу насичення для всіх досліджуваних температур.

Визначена енергія активації дифузії бору в сталі 45 ($Q = 193,0$ кДж/моль) є помітно вищою, ніж для армко-заліза (~157 кДж/моль [7]), і дещо перевищує літературні дані для сталі AISI 1045 (~186,0 кДж/моль [1]). Ця закономірність має чітке фізичне пояснення: присутні у складі сталі 45 вуглець, а також кремній та марганець, створюють поля пружних напружень у кристалічній ґратці заліза та стають додатковими перешкодами для дифузійних стрибків атомів бору, підвищуючи енергетичний бар'єр процесу. Таким чином, простежується чітка тенденція: зі зростанням вмісту вуглецю та легуючих елементів у сталі енергія активації дифузії бору збільшується, що призводить до відносного уповільнення росту шару при однакових температурних режимах. Ця закономірність має важливе значення при виборі температури борування для різних марок сталей.

Домінуючий вплив температури на товщину боридного шару, підтверджений дисперсійним аналізом (частковий етa-квадрат 0,9812), є прямим наслідком експоненційної залежності коефіцієнта дифузії від температури згідно з рівнянням Арреніуса. Важливий практичний висновок з цього: для отримання товстого зміцненого шару за мінімальний час значно ефективніше підвищити температуру процесу, ніж збільшувати тривалість витримки. Це дозволяє не лише скоротити виробничий цикл, але й зменшити енергетичні втрати та ризик надмірної деформації деталей.

Пилкоподібна морфологія боридного шару, що формується на сталі 45, має двоїсту природу. З одного боку, вона забезпечує надійне механічне зчеплення шару з основою (подібно до «ластівчиного хвоста»), що суттєво підвищує адгезійну міцність і знижує ризик відшарування в умовах ударних навантажень. З іншого боку, надмірно розвинута зубчаста границя розподілу може виступати концентратором напружень, знижуючи опір втомі. Тому при проектуванні технологічних режимів борування слід враховувати не лише необхідну товщину шару, а й характер умов навантаження деталі при експлуатації.

Незначний вплив температурно-часових параметрів процесу борування на мікротвердість боридного шару є важливим практичним результатом. Це дає змогу технологу вільно варіювати температуру і час насичення для досягнення необхідної товщини боридного шару, не побоюючись погіршення твердості поверхні. Разом з тим слід зазначити, що переважання фази FeB у зовнішній частині шару, яка має вищу твердість, але є більш крихкою, може бути небажаним для деталей, що працюють в умовах ударних навантажень.

Розроблена регресійна модель другого порядку зі скоригованим коефіцієнтом детермінації 0,9904 є надійним інструментом для прогнозування товщини боридного шару в границях дослідженого факторного простору: температури 850–950°C та тривалості 4–8 годин. Проте важливо наголосити на її емпіричному характері. Екстраполяція результатів за межі цього діапазону є некоректною, оскільки при нижчих температурах кінетика може сповільнюватися через недостатню активацію процесу, а при триваліших витримках можливе поступове зниження активності борвмісних складових насичуючого середовища або спікання порошку, що призведе до відхилення від параболическої залежності.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення факторного простору та вивчення впливу складу насичуючої суміші на кінетику процесу.

Висновки

У ході комплексного дослідження було встановлено кількісні закономірності порошкового насичення бором сталі 45, що дозволило отримати такі основні результати:

1. Борування сталі 45 при температурах 850–950°C забезпечує формування двофазного боридного шару FeB/Fe₂B з характерною зубчастою морфологією, яка сприяє надійній механічній адгезії до основного металу. Зі зростанням обох технологічних параметрів, температури та тривалості борування, спостерігається потовщення шару та збільшення глибини дифузійної зони.

2. Встановлено, що кінетика росту боридного шару на сталі 45 описується параболическим законом дифузії. Експериментально встановлено фундаментальні кінетичні параметри дифузії бору в досліджуваній

системі: енергія активації $Q = 193,0$ кДж/моль та коефіцієнт частоти $D_0 = 6,69 \cdot 10^{-4}$ м²/с, значення яких узгоджуються з літературними даними для подібних систем.

3. Температура насичення бором є визначальним фактором впливу на товщину боридного шару. Результати статистичного аналізу засвідчили значно більший вплив температури ($\eta^2 = 0,9812$) порівняно з тривалістю борування ($\eta^2 = 0,8854$), що обґрунтовує доцільність керування насамперед температурним режимом для досягнення необхідної товщини шару.

4. Застосування методу поверхні відгуку дозволило побудувати емпіричну регресійну модель другого порядку, що описує залежність товщини боридного шару на сталі 45 від температурного режиму борування та часу насичення. Значення скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2_{adj} = 0,9904$ підтверджує виняткову адекватність моделі та обґрунтовує можливість її застосування у технологічному проектуванні в границях розглянутого діапазону параметрів.

Перелік використаних джерел

- [1] Matijević B. Evaluation of Boride layer growth on carbon steel surfaces. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. Vol. 56. Pp. 269–273. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-014-9744-7>.
- [2] Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment / T. Balusamy et al. *Vacuum*. 2013. Vol. 97. Pp. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.04.006>.
- [3] Jurci P., Hudakova M. Characterization of microstructure and fracture performance of boronized H11 grade hot-work tool steel. *Materials Performance and Characterization*. 2020. Vol. 9. Pp. 339–357. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20190086>.
- [4] Simulation of growth kinetics of Fe₂B layers formed on gray cast iron during the powder-pack boriding / M. Ortiz-Dominguez et al. *Materials and Technology*. 2014. Vol. 48. Pp. 905–916.
- [5] Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders / M. S. Karakas et al. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 63. Pp. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.24425/118923>.
- [6] Kayali Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace. *Vacuum*. 2015. Vol. 121. Pp. 129–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.08.006>.
- [7] Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron / I. Campos-Silva et al. *Surface Engineering*. 2011. Vol. 27. Pp. 189–195. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708410X12550773057820>.
- [8] Sen S., Sen U., Bindal C. An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 191. Pp. 274–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.03.040>.

- [9] Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis / Campos I. et al. *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. Pp. 8662–8667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.12.002>.
- [10] Allaoui O., Bouaouadja N., Saindarnan G. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. Pp. 3475–3482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.238>.
- [11] Béjar M. A., Moreno E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 173. P. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.12.006>.
- [12] Yalamaç E., Türkmen I., Firtina Ö. Characterization and kinetic analysis of iron boride layer formed on the GGG 70 ductile cast iron. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021. Vol. 74. Pp. 1701–1711. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02249-y>.
- [13] Hardness optimization of boride diffusion layer on ASTM F-75 alloy using response surface methodology / J. L. Arguelles-Ojeda et al. *Revista Mexicana de Física*. 2017. Vol. 63. Pp. 76–81.
- [14] Dybkov V. I. Basics of Formation of Iron Boride Coatings. *Journal of Mineral, Metal and Material Engineering*. 2016. Vol. 2. Pp. 30–46.
- [15] A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels / I. Uslu et al. *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. Pp. 1819–1826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.019>.

KINETICS STUDY OF BORONIZING ON MEDIUM-CARBON STEEL

Barmin O.Y.

PhD (Engineering), associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>, e-mail: axel.com.ua@gmail.com;

Hryhorieva S.V.

engineer, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>, e-mail: kapuchinka84@gmail.com

The article investigates the patterns of boride coating development on steel 45 under powder-pack boriding conditions and examines how processing temperature and saturation time affect coating architecture, microhardness, and diffusion kinetics. **Purpose.** The study aims to quantify the relationships governing boride coating formation on structural steel 45, assess the individual and combined effects of temperature and saturation time on coating architecture and surface hardness, and construct a predictive mathematical model for coating thickness as a function of process variables. **Methods.** Steel 45 specimens were borided in a mixture of boron carbide, potassium tetrafluoroborate, and aluminum oxide at 850, 900, and 950°C with holding times of 4, 6, and 8 hours, with a minimum of 50 measurements per specimen. Growth kinetics were described by the parabolic diffusion law and the Arrhenius equation. Statistical analysis applied analysis of variance and regression analysis within the Response Surface Methodology framework. **Results.** Boriding produces a layer with sawtooth morphology. Layer thickness increases from 102 to 308 μm. Activation energy of 193.0 kJ/mol and frequency factor of $6.69 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ were determined. Microhardness of the boride zone reaches 16–20 GPa and is governed by phase composition. A second-order regression model describes layer thickness with an adjusted coefficient of determination of 0.9904. **Scientific novelty.** For the first time for steel 45, a complete set of boron diffusion kinetic parameters has been determined and a regression model developed that quantitatively links boride layer thickness to temperature and treatment duration with an approximation accuracy of 99.04%. **Practical significance.** The model serves as a ready-to-use engineering tool for calculating boriding conditions for steel 45 without additional experiments and is applicable to the production of wear-resistant components without transitioning to more expensive materials.

Keywords: boriding; boride layer; growth kinetics; activation energy; microstructure; regression model.

References

- [1] B. Matijević, “Evaluation of Boride layer growth on carbon steel surfaces,” *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 56, pp. 269–273, 2014. doi: [10.1007/s11041-014-9744-7](https://doi.org/10.1007/s11041-014-9744-7)
- [2] T. Balusamy, T. S. N. Sankara Narayanan, K. Ravichandran, I. Song Park, and M. H. Lee, “Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment,” *Vacuum*, vol. 97, pp. 36–43, 2013. doi: [10.1016/j.vacuum.2013.04.006](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.04.006)
- [3] P. Jurci and M. Hudakova, “Characterization of microstructure and fracture performance of boronized H11 grade hot-work tool steel,” *Materials Performance and Characterization*, vol. 9, pp. 339–357, 2020. doi: [10.1520/MPC20190086](https://doi.org/10.1520/MPC20190086)
- [4] M. Ortiz-Dominguez, M. A. Flores-Rentería, M. Keddam, M. Elias-Espinosa, O. Damian-Mejía, J. I. Aldana-González, J. Zuno-Silva, S. A. Medina-Moreno, and J. G. González-Reyes, “Simulation of growth kinetics of Fe₂B layers formed on gray cast iron during

- the powder-pack boriding,” *Materials and Technology*, vol. 48, pp. 905–916, 2014.
- [16] M. S. Karakas, A. Gunen, E. Kanca, and E. Yilmaz, «Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders,” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 63, pp. 159–165, 2018. doi: **10.24425/118923**.
- [5] Y. Kayali, “Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace,” *Vacuum*, vol. 121, pp. 129–134, 2015. doi: **10.1016/j.vacuum.2015.08.006**
- [6] I. Campos-Silva, M. Ortiz-Domínguez, H. Cimenoglu, R. Escobar-Galindo, M. Keddam, M. Elías-Espinosa, and N. López-Perrusquia, “Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron,” *Surface Engineering*, vol. 27, pp. 189–195, 2011. doi: **10.1179/026708410X12550773057820**
- [7] S. Sen, U. Sen, and C. Bindal, “An approach to kinetic study of borided steels,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 191, pp. 274–285, 2005. doi: **10.1016/j.surfcoat.2004.03.040**
- [8] I. Campos, R. Torres, G. Ramírez, R. Ganem, and J. Martínez, “Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis,” *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 8662–8667, 2006. doi: **10.1016/j.apusc.2005.12.002**
- [9] O. Allaoui, N. Bouaouadja, and G. Sainderran, “Characterization of boronized layers on a XC38 steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 3475–3482, 2006. doi: **10.1016/j.surfcoat.2006.07.238**
- [10] M. A. Béjar and E. Moreno, “Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 352–358, 2006. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2005.12.006**
- [11] E. Yalamaç, I. Türkmen, and Ö. Firtina, “Characterization and kinetic analysis of iron boride layer formed on the GGG 70 ductile cast iron,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 74, pp. 1701–1711, 2021. doi: **10.1007/s12666-021-02249-y**
- [12] J. L. Arguelles-Ojeda, A. Márquez-Herrera, A. L. Saldaña-Robles, A. Saldaña-Robles, M. A. Corona-Rivera, and J. Moreno-Palmerin, “Hardness optimization of boride diffusion layer on ASTM F-75 alloy using response surface methodology,” *Revista Mexicana de Física*, vol. 63, pp. 76–81, 2017.
- [13] V. I. Dybkov, “Basics of Formation of Iron Boride Coatings,” *Journal of Mineral, Metal and Material Engineering*, vol. 2, pp. 30–46, 2016.
- [14] I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, F. G. Celebi, O. Ozdemir, and C. Bindal, “A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels,” *Materials & Design*, vol. 28, pp. 1819–1826, 2007. doi: **10.1016/j.matdes.2006.04.019**

Стаття надійшла 15.02.2026

Стаття прийнята 17.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Бармін О. Є., Григор'єва С. В. Дослідження кінетики борування на середньовуглецевій сталі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 145–153. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359798>.

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 669.162.24:621.928.2

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359802

ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНО-СОРТУВАЛЬНИХ МАШИН З СІЮЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ УДАРНОЇ ДІЇ

Пополов Д.В.	д-р техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0347-8627 , e-mail: dmitrykr@ukr.net ;
Засельський В.Й.	д-р техн. наук, професор, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7517-5433 , e-mail: zaselskyi_vy@duet.edu.ua ;
Учитель О.Д.	д-р техн. наук, професор, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6241-1786 , e-mail: uchytel@duet.edu.ua ;
Швед С.В.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2169-8893 , e-mail: shved_sv@duet.edu.ua ;
Засельський І.В.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4834-4027 , e-mail: zaselskyi_iv@duet.edu.ua ;
Зєлова К.Є.	асистент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5727-0621 , e-mail: zielova@duet.edu.ua

Роботу присвячено підвищенню ефективності грохочення сипких матеріалів у металургійному виробництві. Обґрунтовано доцільність застосування вібраційно-ударного режиму роботи грохотів із вільно укладеною сіючою поверхнею. Метою дослідження є визначення впливу такого режиму на технологічні показники грохотів, якість підготовки агломерату та динамічний стан системи. На основі промислових випробувань встановлено, що вібраційно-ударний режим забезпечує зниження забиваності сіючої поверхні, підвищення ефективності грохочення та стабілізацію гранулометричного складу матеріалу. Визначено раціональні діапазони динамічних параметрів та підтверджено адекватність теоретичних положень у промислових умовах. Практична значимість роботи полягає у можливості підвищення ефективності підготовки шихтових матеріалів для зниження енерговитрат у доменному виробництві.

Ключові слова: вібраційний грохот; вібраційно-ударний режим; сіюча поверхня; грохочення; агломерат; гранулометричний склад; ефективність.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку металургійного комплексу характеризується глобальною трансформацією в межах концепції «Green Steel». В умовах імплементації European Green Deal та впровадження механізмів Carbon Border Adjustment Mechanism, енергоефективність стає не лише економічним, а й стратегічним пріоритетом [1-3]. Ключовим чинником, що визначає енергетичні показники доменної плавки є гранулометричний склад шихти. Як зазначається у роботах [4, 5], вирішення питання стабілізації гранулометричного складу шихти, яка подається на колошник доменної печі, дозволяє суттєво оптимізувати газодинамічні процеси. Дослідження підтверджують, що відхилення у фракційному складі шихти призводять до нерівномірного опору шару в печі, що спричиняє збільшення витрати коксу та зростання питомої емісії CO₂.

У зв'язку з цим актуалізується необхідність розроблення та впровадження високоефективних вібраційних машин, здатних забезпечити стабільність гранулометричного складу шихтових матеріалів перед плавкою для зниження енерговитрат на стадії виробництва чавуну.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Як свідчить аналіз конструктивних, динамічних і технологічних показників вібраційних грохотів [6-9], найбільш поширеними в металургійній галузі для видалення некондиційної фракції є центромасні машини з дебалансними віброзбудниками, що працюють у резонансній області. З конструктивної точки зору такі машини відрізняються простотою компонування, надійною віброізоляцією корпуса та стабільністю робочого режиму. Проте, незважаючи на ці переваги, конструкція типових дебалансних віброзбудників не дозволяє оперативно регулювати інтенсивність дії на матеріал, яка залишається невисокою і розподіленою по стадіях випадковим чином. Конструктивні параметри робочих органів існуючих грохотів, як правило, приймаються без глибокого врахування фізико-механічних властивостей конкретного матеріалу. Аналіз технічних характеристик показує, що частота коливань у більшості промислових зразків обмежена діапазоном 73...96 с⁻¹, а амплітуда 3...6 мм. Традиційний підхід до модернізації конструкції шляхом екстенсивного нарощування амплітуди коливань вичерпав себе, оскільки це веде до критичного зростання динамічних

навантажень на вузли кріплення, підшипникові вузли та фундаменти, що суперечить вимогам експлуатаційної надійності та енергозбереження.

Окремим і важливим напрямом досліджень є розробка нових типів сіючих поверхонь [10-13]. Конструктивна недосконалість стандартних плетених, колосникових або перфорованих сит часто призводить до забивання отворів «трудними» зернами, що різко знижує ефективність грохочення. У зв'язку з цим конструктивно перспективним є перехід до систем з незалежним збуренням сіючих поверхонь та впровадження віброударних режимів роботи. Такі конструкції забезпечують ефект самоочищення та дозволяють інтенсифікувати процес просіювання без значного збільшення маси корпусу грохоту.

Для усунення недоліків обладнання, яке використовується для виділення некондиційної частини металургійної шихти на вібраційних грохотах, співробітниками кафедри Інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій була запропонована конструкція вібраційно-ударного грохоту з вільно укладеним ситом [14], який складається з корпуса 1 (рис. 1.), що спирається на раму 2 через пружні елементи 3, і двох самосинхронізованих вібраторів 4.

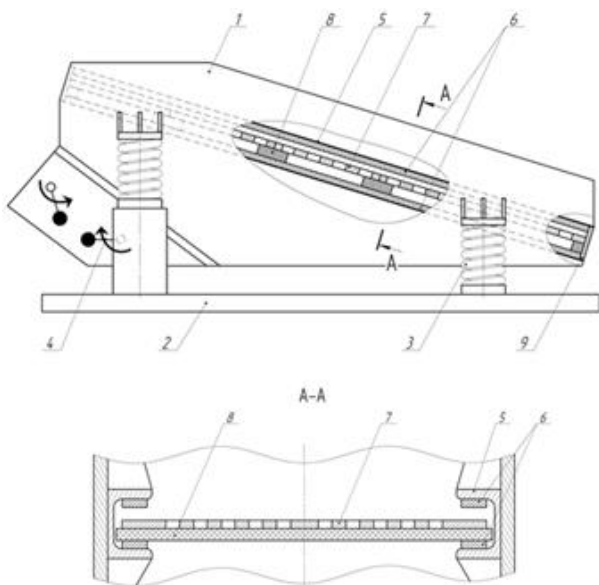


Рис. 1 – Вібраційний грохот з вільно укладеним ситом:
1 – корпус; 2 – рама; 3 – пружний елемент; 4 – вібратор; 5 – підситник; 6 – гумовий амортизатор; 7 – сіюча поверхня; 8 – гумова пластина; 9 – стопорна пластина

На бортовинах корпусу 1 жорстко закріплені швелероподібні підситники 5, верхня та нижня площини внутрішньої поверхні якого футеровані гумовими амортизаторами 6. В утвореному ними просторі укладено сіючу поверхню, яка складається з карт 7, сполучених між собою гумовими пластинами 8, жорсткість котрих

зростає по довжині корпусу 1 для забезпечення збільшення амплітуди коливань сіючої поверхні у напрямку переміщення матеріалу. В розвантажувальній частині грохоту підситники забезпечені стопорними пластинами 9, які перешкоджають переміщенню поверхні вздовж корпусу 1.

При дії вібраторів 4 корпус 1 здійснює лінійно направлені гармонічні коливання, які передаються сіючій поверхні 7. Вільне її укладання між гумовими амортизаторами 6 забезпечує формування ударно-імпульсного режиму коливань із зростанням амплітуди вздовж напрямку руху матеріалу. Це сприяє інтенсивному розрихленню та перемішуванню шару, посиленню сегрегаційних процесів і прискоренню надходження дрібних фракцій до сіючої поверхні. Додатково ударна взаємодія з елементами підситників 5 забезпечує відрив матеріалу від поверхні та її самоочищення від важкопросіюваних частинок.

Для запропонованої конструкції грохоту було виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень. Зокрема, отримано математичну модель, що описує динамічний стан сіючої поверхні, вільно укладеної в просторі, утвореному швелероподібним підситником, в умовах вібраційно-ударної дії [15]. Підчас лабораторних досліджень вивчена динаміка системи, внутрішньозарові процеси у шихтових матеріалах під дією вібраційно-ударного навантаження, а також процеси очищення сіючої поверхні під час грохочення, визначено раціональні кінематичні та динамічні параметри, які забезпечують відповідність технологічним вимогам підготовки шихти перед плавкою [16].

Водночас для остаточного підтвердження достовірності отриманих результатів необхідним є проведення їх перевірки в промислових умовах.

Мета статті

Метою статті є визначення впливу вібраційно-ударного режиму роботи грохоту на його технологічні показники, стабілізацію гранулометричного складу та механічної міцності частинок, а також забезпечення сталості режиму коливань робочого органу на основі результатів промислових досліджень.

Матеріали та методи

Для досягнення поставленої мети вирішувалася комплекс задач, спрямованих на порівняльну оцінку основних технологічних показників роботи грохотів, зокрема: транспортної продуктивності, забиваності сіючої поверхні, ефективності грохочення, міцності агломерату відповідно до [17], а також оцінку процесу самосинхронізації віброзбудників після дії ударної складової режиму.

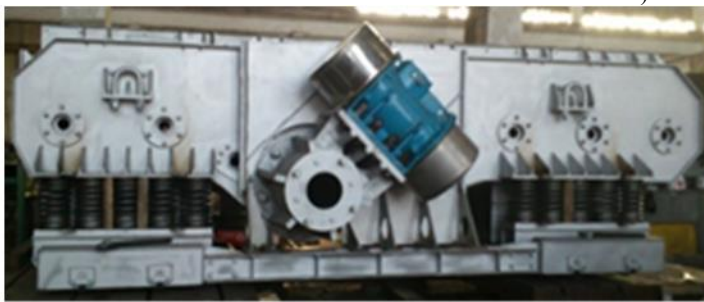
Промислові випробування проводилися в умовах доменного цеху № 1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на двох вібраційних грохотах ГС-3,5×1 (рис. 2а), а також на агломераційній фабриці АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» на вібраційному

грохоті гарячого агломерату ГСТ-61.МЗ (рис. 2б). Досліджуване обладнання було розроблене ТОВ «КВМШ плюс» у співпраці з кафедрою інжинірингу з

галузевого машинобудування Державного університету економіки і технологій.



а)



б)

Рис. 2 – Грохот: ГС-3,5×1 (а); ГСТ-61.МЗ (б)

Грохоти ГС-3,5×1 були встановлені у підбункерних приміщеннях бункерної естакади доменної печі № 8 та виконували розсів агломерату, тоді як грохот ГСТ-61.МЗ був розміщений в розвантажувальній частині агломераційної машини після стадії дроблення для грохочення гарячого агломерату.

Для реалізації вібраційно-ударного режиму забезпечувалося вільне переміщення листів з апертурою, що формують сіючу поверхню грохоту, шляхом послаблення болтових з'єднань вкладишів із подальшим їх фіксуванням деформівними шайбами. Це забезпечувало можливість переміщення елементів сіючої поверхні на висоту до 10 мм.

Дослідження виконувалися у два етапи з обмеженим діапазоном варіювання параметрів, що зумовлено необхідністю дотримання технологічного регламенту виробництва.

На першому етапі вивчалася залежність технологічних показників (транспортна продуктивність, забиваність сіючої поверхні, ефективність грохочення) від динамічних параметрів роботи грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.МЗ. Як узагальнений параметр використовувалося прискорення коливань коробу ($A \cdot \omega^2$) у діапазоні 26...33 м/с². Заданий рівень прискорення досягався

при сталому значенні амплітуди ($A = 0,003$ м) шляхом регулювання частоти коливань ω за допомогою частотного перетворювача.

На другому етапі оцінювався вплив ударної взаємодії матеріалу із сіючою поверхнею на стабілізацію гранулометричного складу агломерату. Оцінювання здійснювалося за результатами порівняльного аналізу виходу фракції понад 5 мм після барабаних випробувань. Дослідження проводилися на грохоті ГС-3,5×1 у діапазоні прискорень коливань коробу $A \cdot \omega^2 = 25...44$ м/с².

В умовах шихтоподачі доменної печі транспортна продуктивність грохоту визначалась шляхом хронометражу заповнення матеріалом вагової воронки, а в умовах агломераційної фабрики – заповнення матеріалом бункеру надрешітного продукту. Тривалість процесу накопичення матеріалу в обох випадках фіксувалася за допомогою секундоміра, його маса у ваговій воронці визначалась за показниками ваговимірювальних пристроїв пульта керування подачею шихти, а в бункері – шляхом виміру маси матеріалу поданого грохотом.

Оцінка забиваності сіючої поверхні виконувалась за допомогою її фотографування, знімки робились в однакових умовах освітлення та з однакової відстані

очищеного та захищеного сита, після чого за допомогою програмного забезпечення ImageJ виконувалась обробка зображень шляхом перетворення їх в градації сірого, покращення контрасту для чіткого відокремлення відкритих і захищених отворів, бінаризації зображення з встановленням порогу, який дозволяє відокремити забиті області від чистих, виділення контурів забитих зон та визначення площі кожного з отриманих фрагментів. Величину забиваності підраховували використовуючи залежність

$$K_{\text{заб}} = \frac{S_{\text{заб}}}{S_{\text{ж.п}}} \cdot 100 \%,$$

де $S_{\text{заб}}$ – площа забитих отворів сіночої поверхні, м²; $S_{\text{ж.п}}$ – площа живого перетину сіночої поверхні, м².

Для визначення ефективності грохочення проводився ситовий аналіз надрешітного продукту по класу 0...5 мм, для чого за допомогою спеціального пробовідбірника бралася проба агломерату, що розвантажувалася з грохоту. Вага проби становила 250 кг, це забезпечувало її представництво відповідно до рекомендацій [18], за отриманими даними ефективність грохочення визначалася за формулою

$$E = 10^4 \cdot \frac{\alpha - \nu}{\alpha \cdot (100 - \nu)} \%,$$

де α – вміст класу 0...5 мм в агломераті, що надходив на грохочення (надавався відділом контролю якості), %; ν – вміст класу 0...5 мм в надрешітному продукті, що розвантажувалася з грохоту (результати ситового аналізу надрешітного продукту), %.

Для визначення якості стабілізації гранулометричного складу агломерату як при ординарному вібраційному впливі, так і при вібраційно-ударному, виконувалась оцінка виходу фракції більше 5 мм після випробувань агломерату на міцність в обертовому барабані відповідно ДСТУ 3200-95. Пробовідбір агломерату відбувався на перепаді потоку надрешітного продукту ручним способом відповідно до вимог ДСТУ 3195:2015. Маса точкової проби складала 5 кг, а їх кількість дорівнювала 12. Об'єднану пробу підготовлювали згідно з ДСТУ 3196:2015 та піддавали квартуванню, таким чином маса навіски складала 15 кг. Міцність агломерату визначалась

$$X = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \cdot 100 \%,$$

де m_1 – маса фракції більше 5 мм після випробувань в барабані, кг; m_2 – маса фракції менше 5 мм та більше 0,5 мм після випробувань в барабані, кг; m_3 – маса фракції менше 0,5 мм після випробувань в барабані, кг.

Враховуючи ударні навантаження від дії вільно укладеної сіночої поверхні з матеріалом, розташованим на ній, а також особливості формування навантаження вібраційних грохотів, працюючих в транспортно-технологічних лініях агломераційних фабрик, на протязі всієї реалізації програми експериментальних досліджень здійснювався контроль синфазності дебалансів вібраторів, який виконувався за допомогою фазових

датчиків, сигнал від котрих надходив до багатоканального цифрового осцилографа DS1054 20.

Для отримання достовірних результатів їхня обробка проводилася методами математичної статистики [19-21].

Виклад основного матеріалу

На основі графічного аналізу результатів промислових досліджень встановлено залежності технологічних характеристик досліджуваних грохотів від зміни їх динамічних параметрів, зокрема кутової частоти коливань короби (рис. 3).

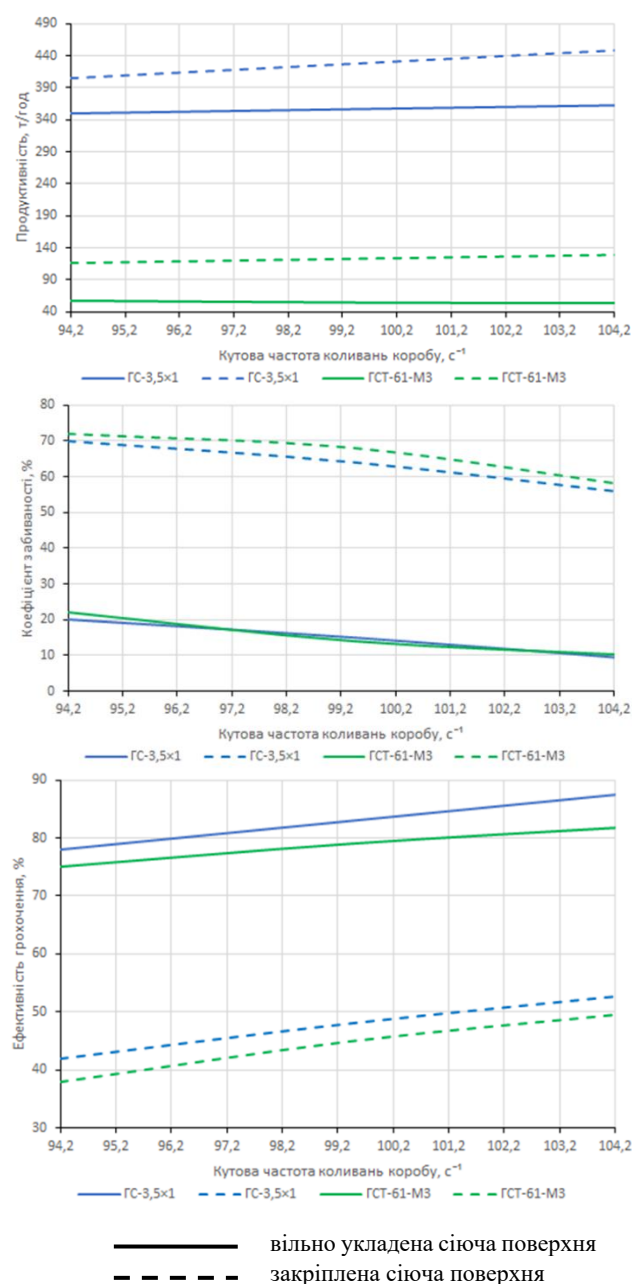


Рис. 3 – Технологічні характеристики грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.М3

Отримані залежності свідчать, що реалізація вібраційно-ударного режиму, зумовленого невідтворюваним зв'язком між ситом і коробом, призводить до зменшення транспортної продуктивності грохоту на 17...56%, зниження забиваності сіючої поверхні у 6 разів та підвищення ефективності грохочення на 43% порівняно з ординарним режимом за однакових динамічних параметрів.

Результати досліджень щодо стабілізації гранулометричного складу та механічної міцності агломерату, обробленого на грохоті ГС-3,5×1, наведено на рис. 4. Встановлено, що за умов реалізації вібраційно-ударного режиму стабілізація гранулометричного складу найбільш інтенсивно відбувається в діапазоні прискорень коливань коробки 30...40 м/с², що забезпечує зменшення вмісту класу –5 мм в агломераті на 5 %.

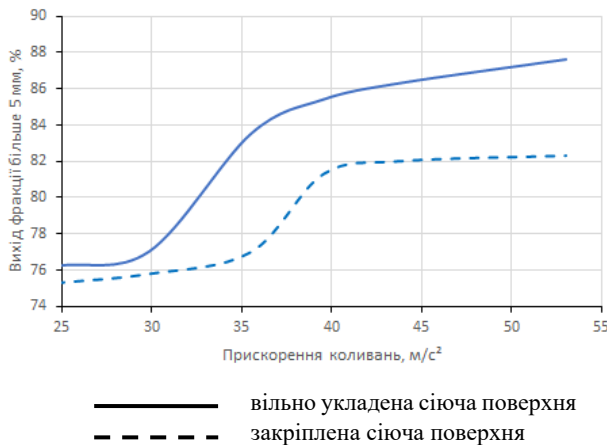


Рис. 4 – Залежність виходу фракції більше 5 мм від прискорення коливань коробки

На рис. 5 наведено осцилограми синфазності дебалансів вібраторів грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.М3 у досліджуваному діапазоні прискорень коливань коробки $A \cdot \omega^2 = 26 \dots 33$ м/с².

Аналіз осцилограм показав, що зі збільшенням прискорення (за сталої амплітуди коливань) на 11 % кут взаємного фазового зсуву дебалансів у процесі самосинхронізації зменшується в середньому на 17 %. Це опосередковано підтверджує скорочення часу несталого руху вільно укладеної сіючої поверхні зі зростанням частоти коливань коробки.

Екстраполяція отриманих у промислових умовах залежностей зміни фазового зсуву дебалансів від прискорення коливань коробки (рис. 6) дозволяє з достатньою точністю прогнозувати степеневий характер залежності часу несталого руху сіючої поверхні від прискорення коливань коробки.

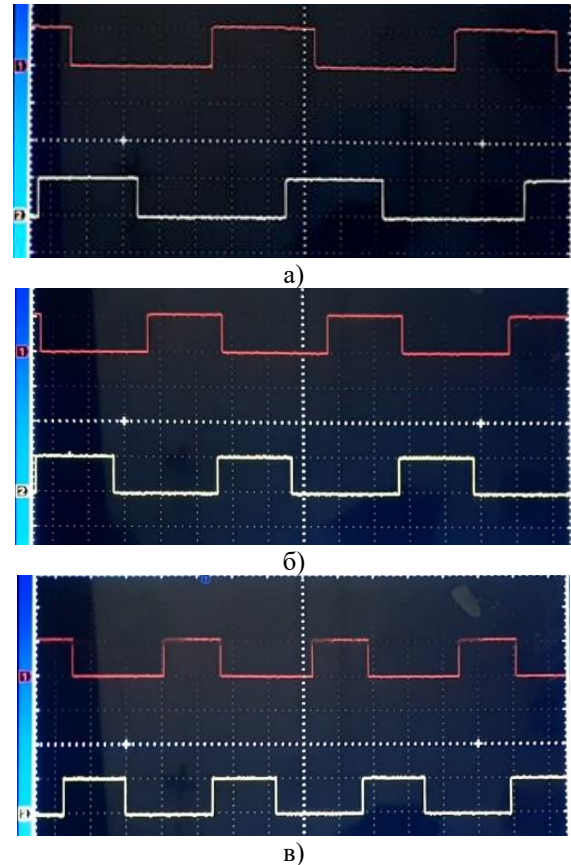


Рис. 5 – Осцилограми синфазності дебалансів вібраторів у досліджуваному діапазоні прискорень коливань коробки грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.М3: а – 26,6 м/с²; б – 29,7 м/с²; в – 32,9 м/с²

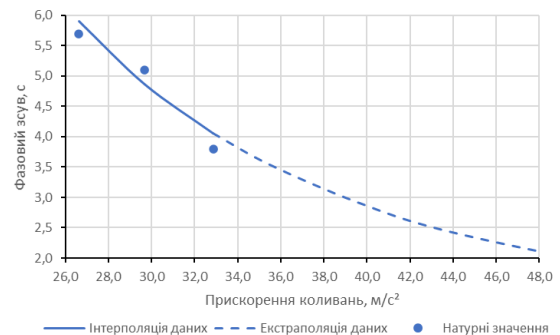


Рис. 6 – Залежність фазового зсуву дебалансів від прискорення коливань коробки

Результати та їх обговорення

Отримані результати промислових досліджень підтверджують встановлені під час аналітичних і лабораторних досліджень закономірності формування вібраційно-ударного режиму роботи грохота, зумовленого невідтворюваним зв'язком між ситом і коробом. Зокрема, доведено існування особливого динамічного стану сіючої поверхні, що характеризується

реалізацією ударно-імпульсної взаємодії та забезпечує інтенсифікацію процесів розрихлення, та сегрегації.

Встановлено, що впровадження такого режиму супроводжується одночасним зниженням транспортної продуктивності та суттєвим покращенням якісних показників процесу грохочення, зокрема зменшенням забиваності сіючої поверхні та підвищенням ефективності розділення. Це свідчить про доцільність використання вібраційно-ударного режиму в умовах, де визначальним є забезпечення стабільності гранулометричного складу матеріалу.

Експериментально підтверджено, що необхідний рівень стабілізації гранулометричного складу агломерату та підвищення механічної міцності частинок надрешітного продукту (фракції 5...40 мм) досягається за рахунок їх селективного руйнування по концентраторах напружень у процесі ударної взаємодії з сіючою поверхнею, вільно укладеною в просторі підситника віброуючого коробу.

Разом із тим встановлено, що зміна динамічних параметрів системи впливає на умови самосинхронізації вібробудників, що проявляється у зменшенні фазового зсуву дебалансів зі зростанням прискорення коливань. Це опосередковано підтверджує скорочення тривалості несталих режимів руху сіючої поверхні та стабілізацію її динамічного стану.

Таким чином, отримані результати свідчать про ефективність застосування вібраційно-ударного режиму для інтенсифікації процесів грохочення та підвищення якості підготовки шихтових матеріалів, а також підтверджують адекватність раніше розроблених теоретичних положень у промислових умовах.

Висновки

В умовах металургійного та гірничого виробництва проведено промислові випробування вібраційних грохотів гарячого агломерату із сіючою поверхнею вібраційно-ударної дії, за результатами яких встановлено, що реалізація вібраційно-ударного режиму, зумовленого невідтворюваним зв'язком між ситом і коробом, супроводжується зменшенням транспортної продуктивності на 17...56%, водночас забезпечуючи суттєве покращення якісних показників процесу, зокрема зниження забиваності сіючої поверхні у 6 разів та підвищення ефективності грохочення на 43% порівняно з ординарним режимом за однакових динамічних параметрів. Встановлено, що найбільш інтенсивна стабілізація гранулометричного складу агломерату відбувається в діапазоні прискорень коливань коробу 30...40 м/с², що дозволяє зменшити вміст класу –5 мм на 5%. Показано, що збільшення прискорення коливань коробу на 11% за сталої амплітуди призводить до зменшення в середньому на 17% кута фазового зсуву дебалансів у процесі самосинхронізації вібробудників, що опосередковано підтверджує скорочення тривалості несталих режимів руху вільно укладеної сіючої поверхні зі зростанням частоти коливань за

степеневим законом та узгоджується з отриманими теоретичними й уточненими експериментальними залежностями.

Перелік використаних джерел

- [1] Hubatka S., Baricová D., Bulko B. Decarbonisation of the metallurgical industry. Prague: Nakladatelství Leges, 2025. 223 p.
- [2] Yao X., Xie H. Renewable energy and green metallurgy technology. *Processes*. 2024. Vol. 12, no. 2. Article 340. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12020340>.
- [3] Environmental and Socio-Economic Impacts of the Circular Economy Transition in the EU Steel Sector - Analysing steel material flows with life cycle-based and macroeconomic assessment models / A. Wagner et al. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. 189 p. DOI: <https://doi.org/10.2760/7855491>.
- [4] Товаровський І. Г. Нормативна оцінка впливу параметрів доменної плавки на витрату коксу та продуктивність. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2014. № 28. С. 117-131.
- [5] Теорія та практика підготовки металургійного коксу до доменної плавки: монографія / В. Г. Гусак та ін. Київ: Наукова думка, 2011. 216 с.
- [6] Грохоти вібраційні // Укрмінерал інвест. URL: <https://mineraltech.com.ua/ua/vibrationscreen.html> (дата звернення: 20.11.2025).
- [7] Sandvik Screens. Sweden: Sandvik mining and construction, 2008. 14 с.
- [8] Screens // Schenck Process. URL: <https://www.schenckprocess.com> (дата звернення: 20.11.2025).
- [9] Screens and screening equipment // Metso. URL: <https://www.metso.com> (дата звернення: 20.11.2025).
- [10] Kinematics characteristics of the vibrating screen with rigid-flexible screen rod and the behavior of moist coal particles during the dry deep screening process / H. Jiang et al. *Powder technology*. 2017. Vol. 319. Pp. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.036>.
- [11] Studying of movement kinematics of dynamically active sieve / D. Popolov et al. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 23, no. 1. Pp. 94–97. DOI: <https://doi.org/10.2478/mme-2019-0013>.
- [12] Булат А. Ф., Шевченко Г. О. Вплив полічастотних коливань сіючих поверхонь вібраційних грохотів на поділ сипких матеріалів. *Науковий вісник НГУ*. 2010. № 4. С. 92–97.
- [13] Шевченко О. І. Розвиток наукових основ процесу віброударного зневоднення техногенної сировини гранулометричного складу, який змінюється: дис. д-ра ... техн. наук: 05.15.09. Дніпро, 2021. 554 с.
- [14] Вібраційний грохот: пат. 122940 Україна: В07В 1/40, 1/46. № u201710088; заявл. 18.10.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.

- [15] Засельський В. Й., Пополов Д. В. Математична модель руху сіячої поверхні грохоту в умовах її ударно-вібраційної дії. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 4. С. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2023.04>.
- [16] Засельський В. Й., Пополов Д. В. Лабораторні дослідження динамічного стану жорсткої сіячої поверхні, діючої в вібраційно-ударному полі. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 1(49). С. 152–160. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321237>.
- [17] ДСТУ 3200-95. Руди залізні і марганцеві, агломерати і окатки. Метод визначення міцності в обертовому барабані. [На заміну ГОСТ 15137-77 ; чинний від 1995-09-19]. Київ : Держстандарт України, 1995. 7 с.
- [18] Серго Є. Є. Опробування та контроль технологічних процесів збагачення. Київ: Вища школа, 1979. 272 с.
- [19] Longo S. G. Principles and Applications of Dimensional Analysis and Similarity. Parma: Springer Cham, 2021. 428 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79217-6>.
- [20] Upton G., Cook I. Understanding statistics. Oxford University Press, 2003. 657 p.
- [21] Moore D. S. Introduction to the practice of statistics. 6th ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2009. 166 p.

INDUSTRIAL STUDIES OF THE OPERATION OF VIBRATING SCREENING MACHINES WITH AN IMPACT-ACTION SCREENING SURFACE

Popolov D.V.	D.Sc. (Engineering), associate professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0347-8627 , e-mail: dmitrykr@ukr.net ;
Zaselskyi V.Y.	D.Sc. (Engineering), professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7517-5433 , e-mail: zaselskyi_vy@duet.edu.ua ;
Uchytel O.D.	D.Sc. (Engineering), professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6241-1786 , e-mail: uchytel@duet.edu.ua ;
Shved S.V.	PhD (Engineering), associate professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2169-8893 , e-mail: shved_sv@duet.edu.ua ;
Zaselskyi I.V.	PhD (Engineering), associate professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4834-4027 , e-mail: zaselskyi_iv@duet.edu.ua ;
Zielova K.Ye.	assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5727-0621 , e-mail: zielova@duet.edu.ua

The modern development of the metallurgical industry is characterized by increasing requirements for energy efficiency and reduction of carbon emissions in line with the Green Steel transition and the European Green Deal. One of the key factors affecting blast furnace efficiency is the granulometric composition of burden materials, which determines gas-dynamic conditions and fuel consumption. Therefore, improving screening efficiency is an important scientific and practical task. The aim of the study is to determine the influence of a vibration-impact operating mode of vibrating screens on technological performance, stabilization of granulometric composition, and mechanical strength of agglomerate under industrial conditions. The methodology is based on industrial experiments carried out on vibrating screens with a freely supported sieve surface operating in a vibration-impact mode. The evaluation included transport capacity, screening efficiency, sieve clogging, particle strength, and synchronization of vibration exciters. The results show that the vibration-impact mode reduces transport capacity by 17...56%, while significantly improving process quality indicators. In particular, sieve clogging decreases by up to 6 times and screening efficiency increases by 43% compared to the conventional mode under identical dynamic parameters. It is established that stabilization of granulometric composition is most effective at vibration acceleration levels of 30...40 m/s², which allows reducing the content of the –5 mm fraction by 5%. Additionally, an increase in vibration acceleration by 11% leads to a 17% decrease in the phase shift of imbalance masses, indicating improved synchronization and reduced transient processes. The scientific novelty lies in the industrial confirmation of the effectiveness of the vibration-impact screening mode with a freely supported sieve surface. The practical significance consists in improving raw material preparation quality and reducing energy consumption in metallurgical processes. Further research should focus on optimization of design and operating parameters.

Keywords: vibrating screen; vibration-impact mode; sowing surface; screening; agglomerate; granulometric composition; efficiency.

References

- [1] S. Hubatka, D. Baricová, and B. Bul'ko, *Decarbonisation of the Metallurgical Industry*. Prague: Nakl. Leges Publ., 2025.
- [2] X. Yao, and H. Xie, "Renewable energy and green metallurgy technology," *Processes*, vol. 12, no. 2, p. 340, 2024. doi: 10.3390/pr12020340.
- [3] A. Wagner, A. Walker, P. Albizzati, L. Milios, and M. Besler, *Environmental and Socio-Economic Impacts of the Circular Economy Transition in the EU Steel Sector - Analysing steel material flows with life cycle-based and macroeconomic assessment models*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025. doi: 10.2760/7855491.
- [4] I. H. Tovarovskyi, "Normativna otsinka vplyvu parametriv domennoi plavky na vytratu koksu ta produktyvnist" ["Normative Assessment of the Influence of Blast Furnace Parameters on Coke Consumption and Productivity"], *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii – Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, no. 28, pp. 117–131, 2014. (Ukr.)
- [5] L. H. Tusak, A. M. Kuznetsov, A. V. Semchenko, V. E. Popov, A. V. Kuzyn, *Teoriia ta praktyka pidhotovky metalurhiinoho koksu do domennoi plavky [Theory and practice of preparing metallurgical coke for blast furnace smelting]*. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 2011. (Ukr.)
- [6] Hrokhoty vibratsiini (Vibration screens). Ukrmineral invest. [Online]. Available: <https://mineraltech.com.ua/ua/vibrationscreen.html>. Accessed: December 20, 2025. (Ukr.)
- [7] *Sandvik mining and construction*. Sweden, Sandvik screens, 2008.
- [8] Schenck Process. Screens. Schenck. [Online]. Available: <https://www.schenckprocess.com>. Accessed: December 20, 2025.
- [9] Screens and screening equipment. Metso. [Online]. Available: <https://www.metso.com>. Accessed: December 20, 2025.
- [10] H. Jiang et al., "Kinematics characteristics of the vibrating screen with rigid-flexible screen rod and the behavior of moist coal particles during the dry deep screening process," *Powder technology*, vol. 319, pp. 92–101, 2017. doi: 10.1016/j.powtec.2017.06.036.
- [11] D. Popolov, S. Shved, I. Zaselskiy, and I. Pelykh, "Studying of movement kinematics of dynamically active sieve," *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 94–97, 2019. doi: 10.2478/mme-2019-0013.
- [12] A. F. Bulat, and H. O. Shevchenko, "Vplyv polichastotnykh kolyvan siiuchykh poverkhon vibratsiinykh hrokhotov na podil sypkykh materialiv" ["Infusion of polyfrequency vibrations of the surfaces of vibrating screens onto the floor of cohesive materials"], *Nauk. visn. NHU – Scientific newsletter NMU*, no. 4, pp. 92–97, 2010. (Ukr.)
- [13] O. I. Shevchenko, "Rozvytok naukovykh osnov protsesu vibroudarnoho znevodnennia tekhnohennoi syrovyny hranulomet-rychnoho skladu, yakyy zminiuietsia" ["Development of the scientific foundations of the process of vibro-impact watering of technogenic waste in a granulometric warehouse that is changing"], Doctoral thesis, Institute of Geotechnical Mechanics im. M.S. Polyakova National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2021. (Ukr.)
- [14] O. D. Uchytel, V. Y. Zaselskiy, and D. V. Popolov, "Vibratsiinyi hrokhot" ["Vibrating screen"], *UA Patent 122940 Appl. u201710088*, Jan. 25, 2018. (Ukr.)
- [15] V. Y. Zaselskiy, and D. V. Popolov, "A mathematical model of the motion of the screening surface under the conditions of its impact vibration action," *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, no. 4, pp. 31–39, 2023. doi: 10.15802/tpm.4.2023.04. (Ukr.)
- [16] V. Zaselskiy, and D. Popolov, "Laboratory studies of the dynamic state of a rigid sieving surface operating in a vibrational-impact field," *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 1, no. 49, pp. 152–160, 2024. doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321237. (Ukr.)
- [17] *Rudy zalizni i marhantsevi, ahlomeraty i okatky. Metod vyznachennia mitsnosti v obertovomu barabani* [Iron and Manganese Ores, Sinters and Pellets. Method for Determination of Strength in a Rotating Drum], DSTU 3200-95, Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, Ukraine, 1995. (Ukr.)
- [18] Ye. Ye. Serho, *Oprobuvannia ta kontrol tekhnologichnykh protsesiv zbahachennia* [Testing and control of technological processes of enrichment]. Kyiv: Vyshcha shkola Publ., 1979. (Ukr.)
- [19] S. G. Longo, *Principles and Applications of Dimensional Analysis and Similarity*. Cham: Springer Int. Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-79217-6.
- [20] G. Upton, and I. Cook, *Understanding statistics*. Oxford Univ. Press Publ., 2003.
- [21] D. S. Moore, *Introduction to the Practice of Statistics*, 6th ed. New York: W. H. Freeman Co. Publ., 2009.

Стаття надійшла 27.01.2026

Стаття прийнята 20.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Промислові дослідження роботи вібраційно-сортувальних машин з сіноючою поверхнею ударної дії / Д. В. Пополов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 154–161. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359802>.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОВША ОБЛИЦЬОВАНОГО ГУМОТКАНИМИ МАТАМИ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Слабий О.О.	канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1274-2875 , e-mail: burewisnyk@gmail.com ;
Гриджук А.С.	д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1429-8640 , e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com ;
Дмитрів І.В.	канд. техн. наук, доцент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5107-7273 , e-mail: ihor.v.dmytriv@lpnu.ua ;
Суглобов В.В.	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1743-0894 , e-mail: suglobov_v_v@pstu.edu ;
Русаченко О.В.	аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3919-1751 , e-mail: rusachenko_o_v@aspirants.pstu.edu

Робота присвячена розробці чисельної моделі, яка б досліджувала особливості контактної взаємодії ковша навантажувача із гранульованою гірською породою в процесі його роботи та давала можливість визначати доцільність застосування окремих видів його зносостійкого футерування, зокрема на основі гумотканих матеріалів. За об'єкт дослідження обрано навантажувач, що здійснює навантажувальні роботи з гранульованим вапняком. Стінки ковша навантажувача з переважно нормальним напрямком дії сил контактної взаємодії (задня, верхня та бокові стінки) були захищені дисперсно-армованою гумотканою футеровкою, яка по наявних дослідженнях для м'яких порід має кращі зносостійкі властивості порівняно із сталлю, а також володіє іншими технологічними перевагами. Для реалізації поставленої задачі застосовано поєднання двох сучасних систем інженерного аналізу: метод дискретних елементів (Discrete Element Method), за допомогою якого описувалась контактна взаємодія між гірською породою та ковшем, та метод багато тільної динаміки (Multibody Dynamics), який використано для моделювання динаміки та кінематики переміщення ковша та з-подібного важільного механізму його приводу. Розроблена комплексна модель повністю відтворює основний цикл роботи навантажувача, який включає етапи заглиблення в штабель, переміщення, підняття та розвантаження матеріалу. Гранульований вапняк моделювався у вигляді частинок поліедричної форми (sphere-polyhedron) різних розмірів фракцією 75-100 мм та відповідних фізико-механічних властивостей. У ході чисельного експерименту отримано детальні карти розподілу нормальних та тангенціальних напружень на робочих поверхнях футерування зі зміною часу. Встановлено, що пікові навантаження виникають на етапі максимального заглиблення ковша в насип. Аналіз отриманих даних підтвердив висунуту гіпотезу про те, що обрані для футерування зони сприймають переважно нормальні ударні навантаження, тоді як частка тангенціальних зусиль, що викликають абразивне зрізання гуми, є мінімальною. Це може свідчити про доцільність використання гумотканих композитів в слабо навантажених зонах, де вони можуть реалізувати свій потенціал щодо гасіння вібрацій та ударів без ризику швидкого зношування та негативного впливу на конструкцію навантажувача. Результати дослідження доводять доцільність застосування комбінованих схем футерування для роботи з м'якими породами та демонструють ефективність використання зв'язки DEM-MBD моделювання для проектування та оптимізації конструкцій навісного обладнання кар'єрної техніки.

Ключові слова: ківш навантажувача; зносостійке футерування; метод дискретних елементів (DEM); багато-тільна динаміка (MBD).

Постановка проблеми

Ефективність роботи кар'єрної та будівельної техніки безпосередньо залежить від довговічності її робочих органів. Ковші екскаваторів та навантажувачів у процесі роботи піддаються інтенсивному ударному та абразивному зносу та значним динамічним навантаженням. Це призводить до передчасного виходу обладнання з ладу, збільшення витрат на ремонт та простоя техніки. Одним із перспективних напрямків

розв'язання цієї проблеми є футерування (облицювання) внутрішніх поверхонь ковша зносостійкими матеріалами, зокрема гумотканими матами, які мають високі демпфуючі властивості. Завдяки здатності еластомерів до зворотного деформування, такі покриття дозволяють суттєво знизити енергію ударного впливу окремих частинок гірської маси, мінімізуючи втому металевої конструкції ковша. Окрім захисної функції, гумоткане футерування сприяє зменшенню ефекту налипання та намерзання вологого матеріалу, що оптимізує

процес розвантаження та підвищує загальну продуктивність машини. Проте складність прогнозування поведінки такого покриття при взаємодії із неоднорідним середовищем потребує детального аналізу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності робочих органів кар'єрної техніки, зокрема фронтальних навантажувачів, залишається однією з ключових проблем гірничої механіки. В процесі роботи ківш зазнає інтенсивного комбінованого впливу: абразивного зносу при заглибленні в штабель та високоенергетичних динамічних ударів при завантаженні породи. Традиційним підходом до підвищення ресурсу є використання змінних футерувальних плит із високоміцних мартенситних сталей (типу Hardox, Weldox) або наплавлення твердих сплавів [1–3]. Попри високу твердість, такі рішення мають суттєві недоліки: значне збільшення власної маси робочого органу, що знижує коефіцієнт корисного використання вантажопідйомності, та повна відсутність демпфуючих властивостей. Альтернативним напрямком, що набуває поширення в індустрії (рішення компаній Metso, Forech), є застосування композитних полімерних та гумових футеровок [3–6].

Наявні дослідження зносу гумових матеріалів, а також композитів на її основі показують, що дані матеріали мають набагато кращу зносостійкість в порівнянні із сталлю, коли ударна взаємодія спостерігається по нормалі до поверхні [7, 8]. Це досягається за рахунок того, що гума має низький модуль пружності та високий коефіцієнт внутрішнього тертя, за рахунок чого працює як ефективний дисипатор енергії. В результаті збільшується час контактної взаємодії при ударі та, відповідно, знижуються пікові значення миттєвих ударних сил, що позитивно впливає на вібраційне навантаження та зменшує локальні напруження, які виникають в процесі роботи.

Додатковими експлуатаційними перевагами є ефект самоочищення від налипання вологих ґрунтів (адгезія до гуми значно нижча, ніж до металу), а також намерзання. Однак, застосування «чистих» гумових елементів для протидії абразивному зносу обмежене їх низькою стійкістю до мікро-різального впливу гострокутною породою. При малих кутах атаки абразиву гума схильна до мікро-різання та виривання шматків [8–11], що призводить до її швидкого зносу. Для нівелювання цього недоліку сучасні наукові роботи пропонують використання гумотканних дисперсно-армованих композитів. Введення вуглецевого волокна та спеціалізованих кордових тканин у гумову матрицю надає матеріалу анізотропних властивостей, суттєво підвищуючи модуль пружності та твердість матеріалу, зменшуючи при цьому сили тертя та зберігаючи гіперпружну поведінку, необхідну для амортизації ударів і, відповідно, високі показники абразивної стійкості [12–14]. Зважаючи на вищесказане, такі матеріали можуть

бути використані для захисту ненавантажених зон ківшів навантажувачів, що проводять навантажувальні роботи з нетвердими матеріалами (наприклад, вапняком, мергелем, гіпсом), де переважають нормальні ударні навантаження та відсутні значні дотичні сили, а самі матеріали не володіють гострими твердими кромками, що зменшує ефект мікро-різання.

Аналіз ефективності таких композитних футеровок вимагає складних методів розрахунку, оскільки класичні методи механіки суцільного середовища не здатні коректно описати дискретну поведінку сипучого вантажу. Сучасний рівень розвитку обчислювальної механіки передбачає використання методів дискретних елементів (discrete element method, DEM) для дослідження механізмів і машин, що працюють із сипучими та гравійними матеріалами. Використання програмних продуктів DEM дає змогу генерувати реалістичний масив частинок (підтримуються системи із числом частинок більше 1 млн) складної форми та різних розмірів, задаючи їм необхідні властивості фрикційної та ударної взаємодії, що є критичним для коректної оцінки навантажень, що діють на робочі органи екскаваторів та навантажувачів, що підтверджується чисельними дослідженнями на дану тему [15–21]. Для отримання достовірних результатів моделювання робочих органів екскаваторів та навантажувачів в середовищах DEM слід якісно задавати траєкторію їх робочого руху. Дана задача на сьогодні найкраще вирішується в системах багатотільної динаміки (multibody dynamics, MBD), де можна проводити дослідження механізмів, якщо є відома їх тривимірна модель [22, 23]. Враховуючи те, що теперішній розвиток системи інженерного аналізу дозволяє проводити одночасну симуляцію із застосуванням DEM і MBD систем шляхом передачі даних між ними, це дає можливість найбільш точно моделювати роботу ковшів екскаваторів та навантажувачів.

Мета статті

Створення та дослідження моделі процесу контактної взаємодії ковша навантажувача, який футерований дисперсно-армованими гумотканними матами, з гранульованою гірською породою. Детальне дослідження напружено-деформованого стану футеровки та оцінювання ефективності її застосування при навантажувальних роботах. Пошук шляхів оптимізації конструкції ковшів та підвищення їх експлуатаційного ресурсу.

Виклад основного матеріалу

На основі наявних матеріалів про навантажувач [24] створена тривимірна модель його робочого z-подібного важільного механізму із ківшом (рис. 1, В) модифікованої конструкції, задня, верхня та бокові стінки якого футеруються гумотканними матами товщиною 20 мм.

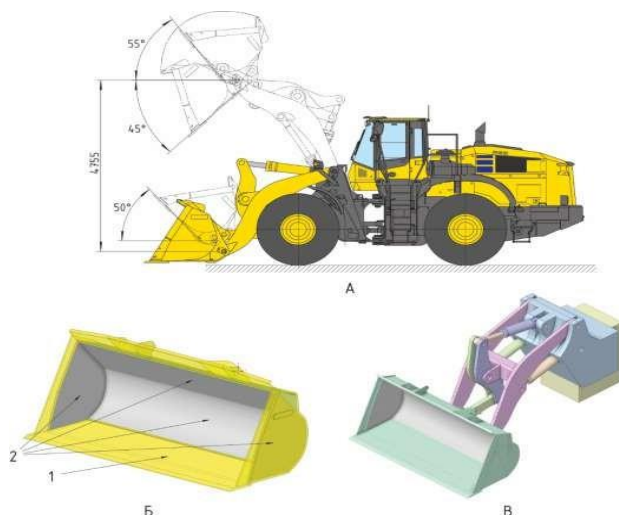


Рис. 1 – Досліджуваний об'єкт: А – схема навантажувача WA-500-8 [24], Б – тривимірний модель модифікованого ковша (1 – ківш, 2 – футеровка ковша), В – тривимірний модель ковша з z-подібним важільним механізмом приводу

Для захисту від передчасного руйнування торці гумотканних матів були захищені металевими клинами (рис. 1, Б). Вибір футерування лиш цих стінок ковша обумовлений висунутою гіпотезою про те, що вони в процесі роботи є помірно навантаженими і сприймають переважно нормальні ударні зусилля, що є найбільш сприятливими режимами роботи зносостійких елементів на основі гуми [8]. Оскільки питання кріплення такої футеровки виходить за межі даного дослідження, приймаємо, що гумоткана футеровка жорстко кріпиться до корпусу ковша по поверхні їх контакту.

Провівши аналіз рішень, що застосовують при вирішенні такого роду задач, було вирішено використати зв'язку програмних продуктів Ansys Motion/Ansys Rocky (MBD/DEM), що дає змогу проводити спільну симуляцію досліджуваного об'єкту завдяки створенню і експорту FMU моделі ковша і його приводу з середовища MBD в середовище DEM. Для цього на основі створеної тривимірної моделі в середовищі Ansys Motion Preprocessor створено модель MBD, що складається із 17 тіл та 14 обертових пар (Revolute Joint), 3 циліндричних пар (Cylindrical joint), якими моделювався взаємозв'язок поршня та циліндра гідроциліндрів, 1 поступальної пари (Translation Joint), що описувала можливість переміщення об'єкту відносно нерухомої системи координат та 5 жорстких з'єднань (Fixed Joint), за допомогою яких описано кріплення футеровки до тіла ковша. Графічне зображення створеної моделі наведено на рис. 2.

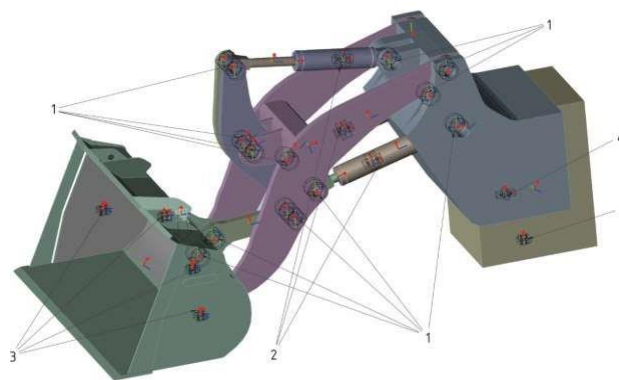


Рис. 2 – Модель ковша з привідним механізмом в середовищі Ansys Motion Preprocessor. 1 – обертові пари, 2 – циліндричні пари, 3 – жорстке кріплення, 4 – поступальна пара

Моделювання руху навантажувача відбувалось шляхом задання контрольованих положень гідроциліндрів стріли та повороту ковша, а також лінійної швидкості шасі відносно глобальної системи координат. Досліджувався один цикл роботи навантажувача тривалістю 20 с, який включав процес забору породи її переміщення та розвантаження. Детальніше досліджуваний цикл роботи навантажувача наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Опис досліджуваного робочого циклу навантажувача

№	Час, с	Горизонтальна швидкість, м/с	Переміщення гідроциліндрів стріли, мм	Переміщення гідроциліндра повороту ковша, мм	Робочий процес
1	0	2.5	0	0	Переміщення до насипу породи та занурення в нього
2	2	2.5	0	0	
3	2.5	1	0	0	
4	3	0.5	0	0	
5	3.5	0.2	-25	-80	Підняття ковша в транспортне положення
6	5.5	0	-50	-250	
7	6.5	-1.5	-75	-250	Від'їзд від насипу породи
8	9	-1.5	-75	-250	
9	9.5	0	-75	-250	
10	10	0	-75	-250	Підняття ковша для розвантаження
11	13.2	0	-860	-250	
12	13.5	1.5	-860	-250	Під'їзд до місця розвантаження
13	15.5	0	-860	-250	
14	16	0	-860	-250	Розвантаження ковша
15	18	0	-860	300	
16	20	0	-860	300	

Чисельні значення переміщень гідроциліндрів визначені по тривимірній моделі відносно початкового положення ковша, шляхом переміщення ковша в одне із його основних положень згідно схеми, наведеної на

рис. 1, А. Усі переміщення рухомих елементів задавались часовими рядами (spline) із подальшою їх апроксимацією сплайном за допомогою функції AKISPL() в рівняннях руху (Function Expression). Для запобігання нерівномірності апроксимацій за допомогою сплайн функції періодів вистою, в часові ряди додатково вводили точки на ділянках вистою. Отриману модель експортовано як FMU-модель для подальшого імпорту в середовище DEM.

Для зменшення кількості частинок, що беруть участь в симуляції, що на пряму впливає на обчислювальну складність і її тривалість, прийнято, що насип гірської породи формується відносно вертикальних стінок, які знаходяться на відстані 1 м від крайніх положень переміщення ковша. Так досягається нівелювання впливу крайових ефектів уклинювання частинок між стінкою та ковшем і моделювання «нетипової» контактної взаємодії. Зважаючи на те, що кінематика руху ковша навантажувача задавалась із 0 с, для формування статичного насипу проведено окреме моделювання в середовищі DEM. Насип формувався шляхом рівномірного генерування частинок в площині 1 (рис. 3, А) з інтенсивністю до 56000 т/год протягом часу 0-3 с та подальшим вистоем утвореного насипу протягом 1 с. В результаті отримано насип з кількістю частинок 81944 та масою 44 т, більшість частинок якого є нерухомими (рис. 3, А), а наявною залишковою швидкістю окремих частинок по схилу можна знехтувати. Форма частинок гірської породи описана моделюю sphere-polyhedron із 14 кутами (рис. 3, Б) та мала три розмірні фракції 75, 80 і 100 мм. Початковий розподіл частинок різних фракцій в насипі можна побачити на рис. 3, В. Механічні властивості породи та матеріалів ковша і параметри їх контактної взаємодії, що використовувались в DEM моделюванні зведені в табл. 2. Для зменшення тривалості симуляції Numerical softening factor встановлений рівним 0,01.

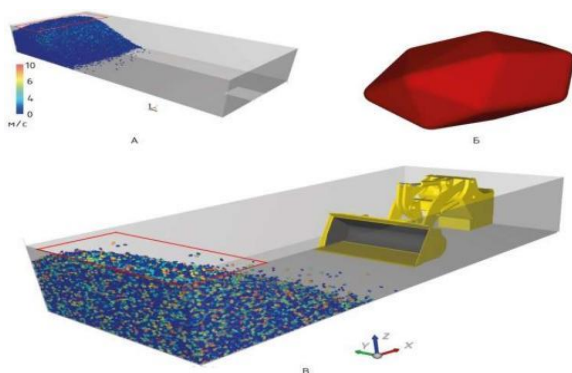


Рис. 3 – Модель системи в середовищі Ansys Rocky: А – результат попереднього моделювання насипу (кольорова градація абсолютна швидкість тіл), Б – тривимірна модель частинки, що використовувалась в моделюванні, В – модель досліджуваної системи в початковий момент часу (кольором відмічені частинки різного об'єму дискретними частинками та частинками і стінками тривірної моделі ковша та його привод)

Після створення насипу в середовище імпортовано FMU-модель ковша та відповідна геометрія. В результаті отримано остаточну модель досліджуваної системи в середовищі DEM (рис. 3, В). Моделювання проводилось на проміжку часу 0-20 с з кроком 0.05 с. В процесі моделювання величина contacts overlap more 2,5% не перевищувала значення 0,18% всіх контактів, що свідчить про чисельну стабільність та достовірність отриманих розрахунків при заданому значенні softening factor.

Таблиця 2

Механічні властивості матеріалів				
№	Властивість	Вапняк	Сталь	Гума
Механічні властивості матеріалів				
1	Густина, кг/м ³	2550	7850	1400
2	Модуль Юнга, ГПа	30	210	0,1
3	Коефіцієнт Пуасона	0,3	0,3	0,45
Взаємодія матеріалів				
№	Властивість	Вапняк-вапняк	Вапняк-сталь	Вапняк-гума
1	Статичний коефіцієнт тертя	0,7	0,55	0,8
2	Динамічний коефіцієнт тертя	0,55	0,35	0,7
3	Коефіцієнт відновлення	0,4	0,5	0,3
4	Коефіцієнт тертя кочення, см	0,4	-	-

На рис. 4 наведено графічне зображення результатів моделювання для різних моментів часу, яке детально описує відносно розташування елементів породи та ковша навантажувача в процесі досліджуваного циклу навантажувальних робіт. Оскільки при моделюванні в DEM тривимірні моделі вважаються абсолютно твердими тілами, за результатами розв'язку моделі можна провести лише оцінку особливостей контактної взаємодії елементів гірської породи із стінками ковша. Аналіз зміни величини зусиль, що діють на ківш, значень контактних швидкостей та розподілу напружень в елементах гірської породи показує, що найбільш навантаженим ківш перебуває в момент заглиблення в штабель гірської породи із піковими значеннями в крайньому положенню, що відповідає моменту часу 3 с в проведеній симуляції. На рис. 5 наведено розподіл експесу нормальної і дотичної ударної швидкості (Kurtosis impact velocity) по ковшу навантажувача, що характеризують нерівномірність пікових локальних значень ударної швидкості відносно середньої величини. Отримані результати показують домінуючі значення ударних навантажень по нормалі в зонах футерування ковша, а також те, що основні ударні навантаження сприймає нижня стінка ковша.

Загалом значення експесів швидкостей не набувають значних величин, які вказують на значну нерівномірність ударної взаємодії. На рис. 6 наведено картину розподілу нормальних та дотичних напружень, що

виникають в елементах гірської породи, яка взаємодіє із ковшем. Отримані значення показують домінування нормальних напружень над дотичними та відносно невелике значення дотичних напружень в зонах футерування ковша. Однак отримані значення для футерування задньої стінки можуть показувати про можливість процесів мікрорізання

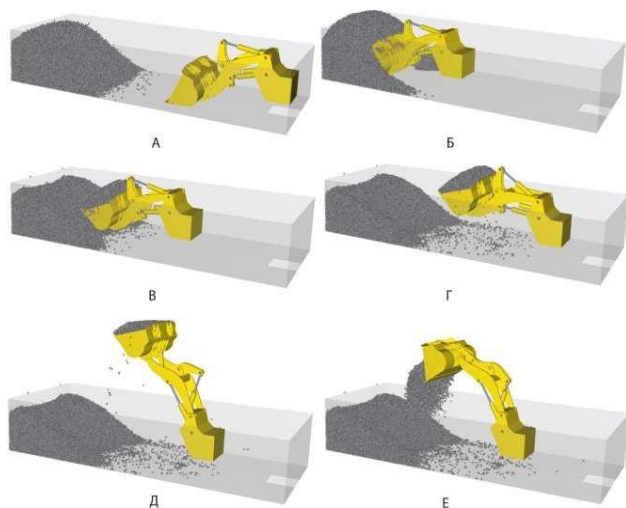


Рис. 4 – Результати моделювання процесу навантаження.
А – 0 с, Б – 3,5 с, В – 7 с, Г – 10,5 с, Д – 14 с, Е – 17,5 с

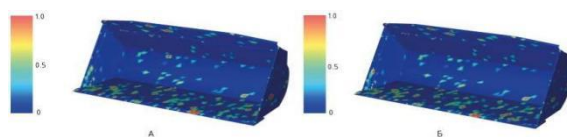


Рис. 5 – Розподіл експесу швидкості ударної взаємодії породи зі стінками ковша в момент часу 3,0 с: А – по нормалі, Б – по дотичній

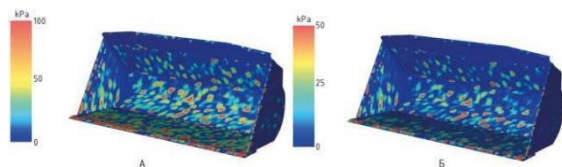


Рисунок 6 – Розподіл напружень в елементах породи при їх ударній взаємодії зі стінками ковша в момент часу 3,0 с: А – по нормалі, Б – по дотичній

Висновки

У роботі розроблено та реалізовано комплексну методику моделювання роботи ковша навантажувача, який футерований дисперсно-армованими гумотканними матами, з використанням систем MBD-DEM (Ansys Motion та Ansys Rocky). Отримана модель дозволяє детально досліджувати процес контактної взаємодії ковша і напружено-деформований стан футеровки та оцінювати ефективність її застосування при навантажувальних роботах з гранульованою гірською

породою. Результати симуляції підтверджують доцільність використання гумотканних матеріалів у зонах з переважанням ударних нормальних навантажень, що відкриває шляхи до оптимізації конструкцій ковшів та підвищення їх експлуатаційного ресурсу.

Перелік використаних джерел

- [1] SAAB. HARDOX wear plate. Hard and tough. URL: <https://www.italautocar.com/> (дата звернення: 25.12.2025).
- [2] Attachment Inc. Hardox in my body. URL: <https://www.amiattachments.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [3] Welding Alloys. Integra engineered wear services. URL: <https://www.welding-alloys.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [4] Forech. Composite rubber and ceramic liners. URL: <https://www.forech.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [5] Masso. Composite rubber and ceramic liners. URL: <https://www.cqmasso.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [6] FirstGraphene. Bucket Wear Liner Trial Results Point to a 6x Improvement in Lifespan. URL: <https://www.firstgraphene.net/bucket-wear-liner-trial-results-point-to-a-6x-improvement-in-lifespan-2/> (дата звернення: 25.12.2025).
- [7] Sare I. R., Mardel J. I., Hill A. J. Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries – an overview. *Wear*. 2001. Vol. 250, no. 1-12. Pp. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00622-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00622-6).
- [8] Rubber Wear: History, Mechanisms, and Perspectives / Xu R., Sheng W., Zhou F., Persson B. N. J. *Tribology Letters*. 2025. Vol. 73, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-025-02025-9>.
- [9] Persson B. N. J., Xu R., Miyashita N. Rubber wear: Experiment and theory. *The Journal of chemical physics*. 2025. Vol. 162, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248199>.
- [10] Nahvi S. M., Shipway P. H., McCartney D. G. Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test. *Wear*. 2009. Vol. 267, no. 11. Pp. 2083–2091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.013>.
- [11] Muhr A. H., Roberts A. D. Rubber abrasion and wear. *Wear*. 1992. Vol. 158, no. 1-2. Pp. 213–228. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90040-F](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90040-F).
- [12] Friction and wear of Stellite 6B during sliding against rubber compound with varied carbon fiber content / D. Han et al. *Polymer Testing*. 2022. Vol. 106. Article 107470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.10747>.
- [13] Wear property improvement by short carbon fiber as enhancer for rubber compound / Q. He et al. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 77. P. 105879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.04.026>.

- [14] Baek D. K., Khonsari M. M. Friction and wear of a rubber coating in fretting. *Wear*. 2005. Vol. 258, no. 5–6. Pp. 898–905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.075>.
- [15] Frank B., Kleinert J., Filla R. Optimal control of wheel loader actuators in gravel applications. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 91. Pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.005>.
- [16] Viscosity Reduction and Drag Reduction Performance Analysis of Bionic Excavator Buckets Based on Discrete Element Method / G. Liu et al. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, no. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110686>.
- [17] Kalkat M., Bahadır M., Yılmaz F. The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 7, no. 1. Pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1324598>.
- [18] Simulation of front end loader bucket–soil interaction using discrete element method / Nezami E. G., Hashash Y. M. A., Zhao D., Ghaboussi J. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2007. Vol. 31, no. 9. Pp. 1147–1162. DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.594>.
- [19] Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method / Y. Wang et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 20. Article 11336. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132011336>.
- [20] Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model / Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. *Computational Particle Mechanics*. 2021. Vol. 8, no. 4. Pp. 825–843. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00372-z>.
- [21] Forsström D., Jonsén P. Calibration and validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. Pp. 274–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.007>.
- [22] Shape Optimization of an Excavator Bucket with the Help of ANSYS Software / Thombarer A. V., Dudhe S. V., Wankhade S. K., Deshmukh C. G. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 08, no. 03. Pp. 378–383.
- [23] Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket / Y. Sun et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 20. Article 11507. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132011507>.
- [24] Komatsu. WA500-8-YardLoader. 2016. URL: <https://www.komatsu.com> (дата звернення: 25.12.2025).

TRESEARCH ON THE LOADING OF A BUCKET LINED WITH HUMID MATS WHEN LOADING BULK MATERIALS

Slaby O.O.	PhD (Engineering), associate professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1274-2875 , e-mail: burewisnyk@gmail.com ;
Gridzhuk A.S.	D.Sc. (Engineering), professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1429-8640 , e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com ;
Dmytriv I.V.	PhD (Engineering), associate professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5107-7273 , e-mail: ihor.v.dmytriv@lpnu.ua ;
Suglobov V.V.	D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1743-0894 , e-mail: suglobov_v_v@pstu.edu ;
Rusachenko O.V.	postgraduate student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3919-1751 , e-mail: rusachenko_o_v@aspirants.pstu.edu

The paper focuses on the development of a numerical model to investigate the features of contact interaction between a loader bucket and granular rock during operation, enabling the assessment of the feasibility of applying specific types of wear-resistant lining, particularly those based on rubber-fabric materials. A loader performing loading operations with granular limestone was selected as the object of study. The bucket walls subject to predominantly normal contact forces (rear, top, and side walls) were protected by a dispersion-reinforced rubber-fabric lining. According to existing studies for soft rocks, this lining exhibits superior wear resistance compared to steel and possesses other technological advantages. To achieve the objective, a combination of two modern engineering analysis systems was applied: the Discrete Element Method (DEM), used to describe the contact interaction between the rock and the bucket, and Multibody Dynamics (MBD), used to simulate the dynamics and kinematics of the bucket movement and its Z-bar linkage drive mechanism. The developed comprehensive model fully reproduces the main operating cycle of the loader, including penetration into the pile, transport, lifting, and unloading of the material. Granular limestone was modeled as polyhedral particles (sphere-polyhedron) of various sizes within the 75–100 mm fraction range, with corresponding physical and mechanical

properties. During the numerical experiment, detailed time-dependent distribution maps of normal and tangential stresses on the lining working surfaces were obtained. It was established that peak loads occur during the stage of maximum bucket penetration into the pile. Analysis of the obtained data confirmed the hypothesis that the zones selected for lining are subjected primarily to normal impact loads, while the proportion of tangential forces causing abrasive cutting of the rubber is minimal. This indicates the feasibility of using rubber-fabric composites in less loaded zones, where they can realize their potential for damping vibrations and impacts without the risk of rapid wear or negative impact on the loader structure. The research results demonstrate the feasibility of applying combined lining schemes for operations with soft rocks and prove the effectiveness of using coupled DEM-MBD simulation for the design and optimization of mining equipment attachments.

Keywords: loader bucket; wear-resistant lining; Discrete Element Method (DEM); Multibody Dynamics (MBD).

References

- [1] SAAB. HARDOX wear plate. Hard and tough. [Online]. Available: <https://www.italautocar.com/>. Accessed on: December 25, 2025.
- [2] Attachment Inc. Hardox in my body. [Online]. Available: <https://www.amiattachments.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [3] Welding Alloys. Integra engineered wear services. [Online]. Available: <https://www.welding-alloys.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [4] Forech. Composite rubber and ceramic liners. [Online]. Available: <https://www.forech.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [5] Masso. Composite rubber and ceramic liners. [Online]. Available: <https://www.cqmasso.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [6] FirstGraphene. Bucket Wear Liner Trial Results Point to a 6x Improvement in Lifespan. [Online]. Available: <https://www.firstgraphene.net/bucket-wear-liner-trial-results-point-to-a-6x-improvement-in-lifespan-2/>. Accessed on: December 25, 2025.
- [7] I. R. Sare, J. I. Mardel, and A. J. Hill, "Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries – an overview," *Wear*, vol. 250, no. 1-12, pp. 1–10, 2001. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00622-6.
- [8] R. Xu, W. Sheng, F. Zhou, and B. N. J. Persson, "Rubber Wear: History, Mechanisms, and Perspectives," *Tribology Letters*, vol. 73, no. 3, 2025. doi: 10.1007/s11249-025-02025-9.
- [9] B. N. J. Persson, R. Xu, and N. Miyashita, "Rubber wear: Experiment and theory," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 162, no. 7, 2025. doi: 10.1063/5.0248199.
- [10] S. M. Nahvi, P. H. Shipway, and D. G. McCartney, "Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test," *Wear*, vol. 267, no. 11, pp. 2083–2091, 2009. doi: 10.1016/j.wear.2009.08.013.
- [11] A. H. Muhr and A. D. Roberts, "Rubber abrasion and wear," *Wear*, vol. 158, no. 1-2, pp. 213–228, 1992. doi: 10.1016/0043-1648(92)90040-F.
- [12] D. Han et al., "Friction and wear of Stellite 6B during sliding against rubber compound with varied carbon fiber content," *Polymer Testing*, vol. 106, article 107470, 2022. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107470.
- [13] Q. He, Y. Zhou, W. Qu, Y. Zhang, L. Song, and Z. Li, "Wear property improvement by short carbon fiber as enhancer for rubber compound," *Polymer Testing*, vol. 77, article 105879, 2019. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.04.026.
- [14] D. K. Baek, and M. M. Khonsari, "Friction and wear of a rubber coating in fretting," *Wear*, vol. 258, no. 5-6, pp. 898–905, 2005. doi: 10.1016/j.wear.2004.09.075.
- [15] B. Frank, J. Kleinert, and R. Filla, "Optimal control of wheel loader actuators in gravel applications," *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 1–14, 2018. doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.005.
- [16] G. Liu, X. Han, Z. Wang, K. Wang, Z. Zhang, and Z. Duan, "Viscosity Reduction and Drag Reduction Performance Analysis of Bionic Excavator Buckets Based on Discrete Element Method," *Biomimetics*, vol. 9, no. 11, 2024. doi: 10.3390/biomimetics9110686.
- [17] M. Kalkat, M. Bahadır, and F. Yılmaz, "The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads," *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 331–339, 2018. doi: 10.28948/ngumuh.1324598.
- [18] E. G. Nezami, Y. M. A. Hashash, D. Zhao, and J. Ghaboussi, "Simulation of front end loader bucket-soil interaction using discrete element method," *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 31, no. 9, pp. 1147–1162, 2007. doi: 10.1002/nag.594.
- [19] Y. Wang et al., "Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 20, p. 11336, 2023. doi: 10.3390/app132011336.
- [20] A. Svanberg, S. Larsson, R. Mäki, and P. Jonsén, "Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model," *Computational Particle Mechanics*, vol. 8, no. 4, pp. 825–843, 2021. doi: 10.1007/s40571-020-00372-z.
- [21] D. Forsström, and P. Jonsén, "Calibration and validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM," *Engineering Failure Analysis*, vol. 66,

pp. 274–283, 2016. doi: 10.1016/j.eng-failanal.2016.04.007.

[22] A. V. Thombarer, S. V. Dudhe, S. K. Wankhade, and C. G. Deshmukh, “Shape Optimization of an Excavator Bucket with the Help of ANSYS Software,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 378–383, 2020.

[23] Y. Sun et al., “Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket,” *Applied Sciences*,

vol. 13, no. 20, p. 11507, 2023. doi: 10.3390/app132011507.

[24] Komatsu, “WA500-8-YardLoader,” 2016. [Online]. Available: <https://www.komatsu.com>. Accessed on: December 25, 2025.

Стаття надійшла 15.11.2025

Стаття прийнята 28.12.2025

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Дослідження навантаженості ковша облицьованого гумотканинами матами при навантаженні сипучих матеріалів / О.О. Слабий та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359804>.

УДК 631.363.21

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359806

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ

Попов С.В.

канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua;

Скоряк Ю.Б.

ст. викладач, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9220-1827>, e-mail: yuliia.skoriak@pdau.edu.ua

Наведено результати експериментальної оцінки ефективності використання конструкції молоткової дробарки. Вона призначена для подрібнення зернових матеріалів. Дослідження були спрямовані на визначення енергетичних показників, продуктивності та якості подрібнення зернових культур (пшениця, ячмінь, кукурудза). Наведено методику експериментів. Вона містить вимірювання питомих витрат електричної енергії, визначення гранулометричного складу продукту помелу за методом ситового аналізу. Встановлено вплив фізико-механічних властивостей зерна, конструктивних параметрів дробарки на ефективність її роботи. Отримані результати можуть бути використані під час проектування та удосконалення подрібнювального обладнання.

Ключові слова: молоткова дробарка; деталі машин; зернові матеріали; подрібнення; енергоефективність; експериментальні дослідження; якість подрібнення; конструкція машини; гранулометричний склад; машинобудування.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності машин для подрібнення зернових матеріалів – важливе завдання сучасного машинобудування та агропромислового комплексу. Молоткові дробарки широко застосовуються у комбікормовому виробництві. Вони прості за конструкцією, універсальні та високопродуктивні. Разом із тим значна частина таких машин характеризується підвищеною енергоємністю, нерівномірною якістю подрібнення, прискореним зношуванням окремих деталей робочих органів. Це обумовлено недостатнім обґрунтуванням конструктивних параметрів молотків, решіт, ротора та режимів роботи з урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів [1–3].

Надмірні питомі витрати електроенергії та утворення великої кількості пилоподібних фракцій негативно впливають на економічні показники експлуатації обладнання, якість кінцевого продукту. Особливо актуальним є це питання для малих і середніх виробництв, де застосовуються компактні конструкції дробарок із обмеженими можливостями регулювання робочого процесу. У зв'язку із цим виникає потреба у проведенні експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності конструкції молоткової дробарки за показниками енергоефективності, продуктивності та якості подрібнення зернових культур.

Отримання експериментальних даних дозволяє встановити взаємозв'язок між конструктивними рішеннями, робочими параметрами машини та результатами подрібнення, а також сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо удосконалення деталей і вузлів дробарок. Це зумовлює актуальність дослідження ефективності конструкції молоткової дробарки з позиції спеціальності «Машинобудування» спеціалізації «Технологічні машини та обладнання» [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наукових публікацій свідчить, що проблематика підвищення ефективності молоткових дробарок для подрібнення зернових матеріалів залишається актуальною як для українських, так і для закордонних дослідників. Актуальним є зниження енергоємності процесу, підвищення якості подрібнення, обґрунтування раціональних конструктивних і режимних параметрів обладнання. Узагальнення результатів дозволить виявити наявні підходи, їх переваги та обмеження, а також визначити напрями подальшого удосконалення конструкцій молоткових дробарок.

Аналіз впливу конструктивних параметрів на продуктивність, якість подрібнення зернових проведено у роботі [5]. Показано, що зміна геометрії молотків, відстані до решіт прямо змінюють енергоспоживання та фракційний склад. Експериментально обґрунтовані функціональні залежності, здійснено вимірювання енергетичних витрат та гранулометрії. Дослідження проведені на незначному діапазоні швидкостей ротора, використано одну типову решітку, мало уваги приділено тривалому зношуванню деталей за реальних умов.

Стаття [6] присвячена економічному оцінюванню модернізації підготовчого етапу технологічних процесів, включаючи подрібнення зерна, з акцентом на співвідношення «енергетичні витрати – продуктивність». Розрахунки засвідчили, що модернізація робочих вузлів та контроль вологості дають помітну економію при великому обсязі матеріалу. Робота має чітку економічну спрямованість, а також корисні підказки для прийняття виробничих рішень. Характеризується незначною кількістю експериментів щодо гранулометрії, а також побічними припущеннями стосовно вартості обслуговування.

Авторами [7] вивчено вплив вологості насіння на вихід кінцевого продукту під час подрібнення у

молотковому та валковому обладнанні. Методика – лабораторні досліди із визначенням виходу по ситам. Визначено оптимальний діапазон вологості для конкретного випадку (11...12%), при відхиленні від якого вихід дрібної фракції зменшується. Дослідження характеризується чіткою експериментальною методикою, практичними рекомендаціями стосовно вологості для оптимального помелу. Досліди проводилися на горохові, а не на зернових, тому пряме перенесення на кукурудзу, пшеницю та ячмінь потребує уточнення.

Дослідженню довговічності та безвідмовності підсистем молоткових дробарок у реальних умовах експлуатації на основі системного підходу та ймовірнісних моделей присвячено роботу [8]. Визначено найменш надійні підсистеми та характер розподілу відмов, що дозволяє обґрунтувати напрями підвищення надійності кормоподрібноувальної техніки. Використано апарат теорії надійності. Виявлено конкретну вузьку ланку, а саме подрібнювальну камеру із кількісним розподілом кормів. На жаль, робота має обмежену кількість експериментальних даних, характеризується відсутністю детального опису умов випробувань. Відсутнє порівняння із сучасними конструкціями. Недостатньо практичних рекомендацій стосовно конструктивних змін із кількісним оцінюванням ефекту.

Експериментальне порівняння запропонованої конструкції машини із класичними подано у джерелі [9]. Доведена істотна економія енергії при грубому подрібненні. Робота характеризується якісними експериментами. Чітке порівняння із загальновідомими режимами обробки. Застосовано практично важливі показники (енергія на тону, ступінь подрібнення). Отримані результати не зовсім корелюються із зерновими (кормовими) матеріалами.

Авторами [10] порівнюються класична та нова геометрія молотків (різні кути, форми) помелу тритикале. Зазначено, що деякі нові форми ротора підвищують продуктивність, знижують рівень енергоспоживання. Наведена ретельна лабораторна методика. Використано сучасні вимірювальні прилади. Здійснено статистичний аналіз. Тим не менш, досліді обмежені кількістю зернових культур. Вони не дають повної картини для широкого спектру вологості, матеріалів.

Поєднання математичної моделі із експериментальною валідацією на реальному підприємстві засвідчило до 18% економії енергії та поліпшення однорідності частинок [11]. Модель має високий коефіцієнт апроксимації. На жаль, модель є складною для швидкого перенесення на інші типи дробарок без додаткового уточнення.

Експериментальне дослідження специфічного молотково-лезової дробарки для гілок із RSM-аналізом параметрів (діаметр, довжина, вологість) наведено в [12]. Робота характеризується визначенням оптимальних параметрів процесу за методом експериментального планування, детальною статистикою, а також практичними рекомендаціями. Кінцеві висновки потребують адаптації під зернові культури.

Отримані регресійні моделі якості помелу й питомої енергії для дробарки за результатами експериментального дослідження переробки пивних дробин [13]. Робота характеризується практичною орієнтацією, чітким визначенням оптимальних характеристик (швидкість, подача, проміжок). Серед недоліків слід відзначити обмежене застосування за межами конкретної сировини, що була розглянута.

Робота [14] сфокусована на оптимізації параметрів молоткового помелу для енергетичної біомаси із використанням статистичних моделей для зниження питомої енергії. Наявний системний статистичний підхід. Чимала увага приділена енергоефективності, повторюваності експериментів для різних біомас. Результати є специфічними, бо пов'язані із конкретною продукцією.

У джерелі [15] здійснено короткий аналіз, що полягає у проведенні експериментів та моделювання для вивчення впливу швидкості ротора, геометрії камери, інших параметрів на ступінь подрібнення. Дослідження характеризується комплексним підходом, широким діапазоном режимів руху зерен. Не використано сучасні підходи, що полягають у використанні DEM-моделей.

Поєднання деталізованого DEM-моделювання із параметричним експериментальним калібруванням процесу помелу кукурудзи у молотковій дробарці простежується у роботі [16]. Сильними сторонами дослідження є точне калібрування моделі на експериментах, можливість прогностично вивчати вплив конструктивних змін без дорогих стендових випробувань. Тим не менш, DEM-підхід чутливий до параметрів модельованих властивостей матеріалу. Також отримані результати потребують експериментальної валідації для нових видів сировини або іншої геометрії робочої камери.

Узагальнення проаналізованих джерел інформації засвідчило, що підвищення ефективності молоткових дробарок переважно зосереджено на зниженні питомих енерговитрат, покращенні гранулометричного складу, обґрунтуванні раціональних конструктивних і режимних параметрів. Більшість робіт демонструє позитивний вплив оптимізації геометрії молотків, швидкості ротора, вологості матеріалу, однак часто обмежуються вузькими діапазонами режимів або конкретною сировиною. Перспективним напрямом є поєднання експериментальних досліджень із математичним та DEM-моделюванням. Саме такий підхід дозволяє прогнозувати ефект від конструктивних змін. Водночас недостатньо уваги приділено питанням універсальності рішень для різних зернових культур. Це й зумовлює необхідність подальших досліджень.

Мета статті

Метою статті є експериментальна оцінка ефективності конструкції молоткової дробарки для подрібнення зернових матеріалів. Для досягнення

поставленої мети у роботі передбачено розв'язання таких завдань: 1) дослідити енергетичні показники роботи дробарки під час подрібнення зернових культур (пшениця, ячмінь, кукурудза); 2) визначити питомі витрати електроенергії та продуктивність установки; 3) оцінити якість подрібнення за гранулометричним складом продукту помелу; 4) проаналізувати вплив фізико-механічних властивостей зерна та конструктивних параметрів робочих органів на ефективність процесу подрібнення. Отримані результати планується використати для обґрунтування раціональних конструктивних рішень та підвищення надійності обладнання за виробничих умов комбікормових підприємств.

Виклад основного матеріалу

Під час проведення експериментальних досліджень як об'єкт подрібнення було використано зерно кукурудзи, ячменю та пшениці. Усі досліджувані культури відповідали чинним нормативним вимогам за показниками вологості, вмісту токсичних елементів, пестицидів, рівнем засміченості та іншими якісними характеристиками. Зерно пшениці перебувало в задовільному стані: без ознак прілоїстості та теплових пошкоджень після сушіння, з властивими йому запахом та забарвленням. Основні фізико-механічні показники пшениці наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні показники пшениці

Найменування показника	Значення
Вологість, не більше, %	14,5
Зернові домішки, не більше, %	8,0
Домішки сміття, не більше, %	3,0
Сажкове зерно, не більше, %	5,0
Масова частка білка, не менше, %	14,0
Масова частка клейковини, не менше, %	30,0
Якість клейковини: група, одиниць приладу ВДК	I, 45-75

Ячмінь додається для оздоровлення, підвищення витривалості худоби. Окрім того, краще перетравлюється та має корисні властивості (табл. 2). Для кормових цілей кукурудза підходить любого типу, зокрема у виді сумішей (табл. 3). Зерно кукурудзи здорове, із нормальним кольором та запахом.

Таблиця 2

Фізико-механічні показники ячменю

Найменування показника	Значення
Вологість, не більше, %	15,5
Зернові домішки, не більше, %	15,0
Домішки сміття, не більше, %	5,0
Мінеральні домішки, не більше, %	1,0
Шкідливі домішки, %	0,2

Таблиця 3

Фізико-механічні показники кукурудзи

Найменування показника	Значення
Вологість, не більше, %	15,0
Сміттеві домішки, не більше, %	5,0
Зернова домішка, не більше, %	15,0

Розроблена конструкція молоткової дробарки ДМ-360 призначена для подрібнення різних видів сировини, відзначається простотою будови, зручністю експлуатації та технічного обслуговування (рис. 1, табл. 4) [4]. Її характерною особливістю є можливість швидкої заміни найбільш зношуваних елементів, зокрема деки, молотків, решета.



Рис. 1 – Дробарка молоткова

Таблиця 4

Технічна характеристика молоткової дробарки [4]

№ з.п.	Найменування характеристики	Одиниці виміру	ДМ-360
1	Продуктивність	кг/год	140...365
2	Частота обертання головної осі	об/хв	3000
3	Робочий діаметр ротора	мм	360
4	Кількість молотків	шт.	6
5	Потужність	кВт	5,5
6	Габаритні розміри	м	550×400×860
7	Маса	кг	60

Дробарка може використовуватися для середнього, дрібного подрібнення матеріалів. Робочим органом є ротор із закріпленими на ньому молотками. Вони виконують функцію ударних елементів. Завдяки невеликим габаритним розмірам обладнання може експлуатуватися за умов обмеженого виробничого простору. Герметичне виконання корпусу дає змогу під'єднати завантажувальні та розвантажувальні ємності, забезпечує мінімальний викид пилу в навколишнє середовище.

Розмір отворів решета суттєво впливає на дисперсність продукту. Експеримент здійснювався на решеті із діаметром отворів 3 мм. Для оцінки та порівняння якості подрібнення визначали середній вміст окремих фракцій. Маса проби становила 3 кг (табл. 5).

Таблиця 5

Дослідження енергоефективності

№ з.п.	Матеріал	Час подрібнення		Питома витрата енергії, Вт·год/кг		Продуктивність, кг/год
		хв.	год.	визначена	середнє	
1	Пшениця	1,11	0,018	33,0	34,4	160
2		1,16	0,019	34,8		
3		1,13	0,019	34,8		
4		1,17	0,019	34,8		
1	Кукурудза	0,47	0,008	14,6	15,1	364
2		0,50	0,008	14,6		
3		0,47	0,008	14,6		
4		0,52	0,009	16,5		
1	Ячмінь	1,43	0,024	44	40,3	136,5
2		1,24	0,021	38,5		
3		1,27	0,021	38,5		
4		1,29	0,022	40,3		

Питома витрата енергії, E , Вт·год/кг:

$$E = t \cdot P / m, \quad (1)$$

де t – час подрібнення, год;

P – потужність електричного двигуна, Вт;

m – маса проби, кг.

Якість подрібнення визначалася за методикою ДСТУ ISO 27708:2013 «Комбікорми. Метод визначення крупності за допомогою методів сіткового аналізу». Використано ситовий класифікатор для оцінки якості подрібнення із наступною послідовністю: 1) відбір 1 кг проби кожного помелу; 2) комплект сит (перше – 1 мм, друге – 2 мм, третє – 3 мм); 3) на верхнє сито насипалася оброблена проба, закріплювалася кришка із набором решіт; 4) сортування на фракції протягом 3 хв; 5) зважування залишеної на решетах фракції та

прохід нижнього решета; 6) обробка результатів. У табл. 6, 7 наведено результати ситового аналізу.

Таблиця 6

Результати ситового аналізу

№ з.п.	Зерновий матеріал	Маса компонентів суміші, г			
		Діаметр решіт, мм			
		піддон	1	2	3
1	Пшениця	240	360	250	150
2		260	340	250	150
3		250	330	270	150
4		255	345	250	150
1	Ячмінь	100	150	300	450
2		110	140	290	460
3		95	155	305	445
4		105	145	310	440
1	Кукурудза	410	300	190	100
2		390	310	200	100
3		420	290	180	110
4		400	310	190	100

Таблиця 7

Обробка експериментальних даних (ситовий аналіз)

Пшениця					
Отвір сита	Середнє, г	Стандартне відхилення, г	Коефіцієнт варіації, %	Абсолютна похибка, г	Відносна похибка, г
Піддон	251,25	8,54	3,40	4,27	1,70
1 мм	343,75	12,50	3,64	6,25	1,82
2 мм	255,00	10,00	3,92	5,00	1,96
3 мм	150,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукурудза					
Отвір сита	Середнє, г	Стандартне відхилення, г	Коефіцієнт варіації, %	Абсолютна похибка, г	Відносна похибка, г
Піддон	405,00	12,91	3,19	6,45	1,59
1 мм	302,50	9,57	3,17	4,79	1,58
2 мм	190,00	8,16	4,30	4,08	2,15
3 мм	102,50	5,00	4,88	2,50	2,44
Ячмінь					
Отвір сита	Середнє, г	Стандартне відхилення, г	Коефіцієнт варіації, %	Абсолютна похибка, г	Відносна похибка, г
Піддон	102,50	6,45	6,30	3,23	3,15
1 мм	147,50	6,45	4,38	3,23	2,19
2 мм	301,25	8,54	2,83	4,27	1,42
3 мм	448,75	8,54	1,90	4,27	0,95

З метою зменшення утворення пилоподібних фракцій під час подрібнення доцільно збільшувати діаметр отворів решета. Підвищений вміст пилу свідчить про несприятливі умови виведення матеріалу з робочої камери, внаслідок чого частинки затримуються всередині, зазнають повторного подрібнення.

Під час досліджень встановлено, що гранулометричний склад зерна після подрібнення характеризується незначними відхиленнями між окремими дослідженнями. Це підтверджує стабільність перебігу процесу подрібнення.

Для пшениці коефіцієнт варіації знаходиться у межах 3...4%. Це свідчить про достатньо рівномірний помел, мінімальні розбіжності між результатами дослідів. Абсолютна похибка середнього значення не перевищує 6,3 г, а відносна – 2%. Вважаємо отримані результати достовірними.

Для кукурудзи також зафіксовано незначну варіацію показників – 3...5%. При цьому відносна похибка не перевищує 2,5%. Це вказує на однорідний і стабільний характер подрібнення. Найменші коливання спостерігаються для фракцій, що затримуються на ситах із отворами 1...2 мм, що відповідають основному помелу.

У випадку ячменю відмічається дещо підвищена варіація дрібних фракцій – до 6%. Це зумовлено неоднорідністю будови зерна, наявністю оболонок, що ускладнюють рівномірне дроблення. Водночас для крупних частинок (сито 3 мм) коефіцієнт варіації зменшується до 1...2%. Це є характерним для грубого помелу.

Проведемо аналіз фракційного складу зернового матеріалу, що зазнав подрібнення (рис. 2).

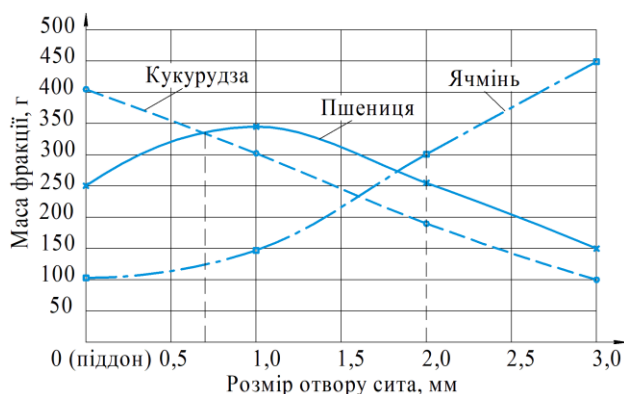


Рис. 2 – Середні значення фракційного складу подрібненого зерна

Ячмінь характеризується волокнистою структурою, підвищеними енергетичними витратами під час подрібнення. Внаслідок цього переважають крупні фракції із максимальним вмістом на ситі із отворами 3 мм. Помел найгрубіший. Пшениця має тверде зерно, проте відсутність оболонок забезпечує більш рівномірне подрібнення. При цьому найбільша частка

матеріалу припадає на середні фракції. Помел середній. Кукурудза відзначається крихкістю. Вона легко піддається руйнуванню. Формується переважно дрібнодисперсний продукт із основною масою частинок на піддоні та ситі з отворами 1 мм. Помел найдрібніший. Взагалі оптимальними для практичного використання є розміри частинок 0,7...2,0 мм.

Висновки

1. Експериментально встановлено, що енергетичні показники процесу подрібнення істотно залежать від виду зернової культури, її фізико-механічних властивостей. Найбільша питома втрата електроенергії зафіксована під час подрібнення ячменю – 40,3 Вт·год/кг. Це пояснюється наявністю плівки та волокнистої структури зерна, що ускладнюють його руйнування. Для пшениці середня питома витрата становить 34,4 Вт·год/кг, а для кукурудзи – лише 15,1 Вт·год/кг. Це зумовлено її підвищеною крихкістю та меншою міцністю зернівки.

2. Встановлено обернену залежність між питомими витратами енергії та продуктивністю дробарки. Найвище її значення отримано при подрібненні кукурудзи – 364 кг/год, що супроводжується мінімальними енерговитратами. Для пшениці продуктивність становить 160 кг/год, а для ячменю – 136,5 кг/год. Це підтверджує нижчу енергетичну ефективність процесу подрібнення ячменю за однакових конструктивних і режимних параметрів дробарки.

3. Ситовий аналіз засвідчив, що процес подрібнення є стабільним, а фракційний склад продукту має незначну варіацію між дослідженнями. Для пшениці коефіцієнт варіації становить 3...4%, що свідчить про рівномірний середній помел. Для кукурудзи варіація також незначна (3...5%). При цьому переважають дрібні фракції, що характеризує найдрібніший помел. Для ячменю спостерігається підвищена варіація на дрібних фракціях (до 6%) і переважання крупних частинок, що відповідає грубому помелу. Рациональним гранулометричним складом для комбікормового виробництва є частинки у межах 0,7...2,0 мм, що в найбільшій мірі забезпечуються під час подрібнення пшениці.

4. Доведено, що фізико-механічні властивості зерна (міцність, крихкість, наявність оболонок) мають визначальний вплив на ефективність подрібнення. Ячмінь внаслідок плівчастої структури потребує багаторазових ударів молотків. Це підвищує енерговитрати, знижує рівномірність помелу. Кукурудза, навпаки, легко руйнується, що зменшує тривалість перебування частинок у камері подрібнення та знижує енергоспоживання. Встановлено, що діаметр отворів решета суттєво впливає на фракційний склад, кількість пиловидних частинок: їх підвищений вміст свідчить про повторну циркуляцію матеріалу в камері та недосконалі умови його відведення. Отже оптимізація конструктивних параметрів решіт є важливим резервом підвищення ефективності процесу подрібнення.

Перелік використаних джерел

- [1] Технологічні машини: підручник / Гнітько С. М., Бучинський М. Я., Попов С. В., Чернявський Ю. А. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 258 с.
- [2] Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Полтава : НУПІ, 2019. 204 с.
- [3] Визначення оптимальних робочих параметрів технологічного обладнання методом ортогонального планування експерименту / Попов С. В., Левченко Ю. В., Басова Ю. О., Попов К. С. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КРПУ, 2023. Вип. 2(139). С. 130-137. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.2.15>.
- [4] Біловод О. І., Попов С. В., Скоряк Ю. Б. Розробка та дослідження енергоощадної молоткової дробарки. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, ТДАТУ, 03-28 листопада 2025 р. Запоріжжя, 2025. С. 157-159.
- [5] Рибальченко В. Д., Костенко О. М. Вплив конструктивних параметрів робочих органів дробарки на процес подрібнення зерна. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КРПУ, 2023. Випуск 4(141). С.138-145. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.17>.
- [6] Купчук І. М., Вовк В. Ю., Дацюк Д. А. Оцінка економічної ефективності технічної модернізації підготовчого етапу технологічного процесу виробництва етанолу. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький: ХНУ, 2020. Вип. 2(283). С. 36-46. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-36-46>.
- [7] Kharchenko Ye., Sharan A., Yeremeeva O. Dependence of flour yield on moisture content of chickpea seeds. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2024. Vol. 12, iss. 2. Pp. 161-174. DOI <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2024-12-2-7>.
- [8] Болтянський О. В., Болтянська Н. І. Дослідження довговічності та безвідмовності підсистем молоткових дробарок в процесі їх експлуатації. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 156. С. 636-640.
- [9] Experimental evaluation of the conjugate anvil hammer mill – Comparison of semi-confined to confined particle breakage / G. Li et al. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 134. Pp. 221-231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.024>.
- [10] Bochat A., Wesołowski L., Zastempowski M. A comparative study of new and traditional designs of a hammer mill. *Transactions of the ASABE*. 2015. Vol. 58, no. 6. Pp. 1737–1746. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10691>.
- [11] Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills and its use in the feed industry: analysis and validation in a case study in Cuba / Y. Castillo-Alvarez et al. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 5. Article 1523. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13051523>.
- [12] Experimental study on the cutting and crushing performance of Caragana korshinskii strips / De X., Li H., Kang J., Yang J. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, no. 9. Article 1584. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091584>.
- [13] Study on performance evaluation and optimization of brewers grains hammer mill / Anh D. L., Tuan N. A., Hung N. V., Thang T. Q. *AIP Conference Proceedings*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 9 April 2021. Vol. 2406. Article 020003. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0066721>.
- [14] Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling / Paraschiv G. et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 2. Article 973. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020973>.
- [15] Naik S., Feng Y., Chaudhuri B. Experiment and model-based investigation of comminution in a hammer mill. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2014. Vol. 2, no. 4. Pp. 362–373. DOI: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V2-N4-362-373>.
- [16] Chiaravalle A. G., Piña J., Cotabarren I. DEM simulation of maize milling in a hammer mill. *Powder Technology*. 2025. Vol. 431. Article 120892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120892>.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE HAMMER MILL DESIGN

Popov S.V.PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua;**Skoriak Y.B.**senior lecturer, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9220-1827>, e-mail: yuliia.skoriak@pdau.edu.ua

Improving the efficiency of machines used for grinding cereal materials is an important task of modern mechanical engineering and the agro-industrial sector. Hammer mills are widely applied in compound feed production due to their simple design, versatility, and high productivity. However, many existing designs are characterized by increased specific

energy consumption, uneven grinding quality, and accelerated wear of working elements, which is largely caused by insufficient justification of design parameters and operating modes with regard to the physical and mechanical properties of grain materials. This paper presents an experimental evaluation of the efficiency of a hammer mill design intended for grinding cereal crops. Experimental studies were carried out using wheat, barley, and maize as grinding materials. All tested grains met regulatory requirements in terms of moisture content and quality indicators. The research focused on determining the specific electrical energy consumption, productivity of the installation, and grinding quality based on particle size distribution. The experiments were performed on a laboratory hammer mill equipped with a rotor operating at a rotational speed of 3000 rpm and a 5.5 kW electric motor. The particle size distribution of the ground product was evaluated by sieve analysis in accordance with relevant standards. Statistical processing of the results was carried out to assess the stability and repeatability of the grinding process. The obtained results showed that energy consumption and productivity significantly depend on the type of grain and its physical and mechanical properties. The highest specific energy consumption was observed during barley grinding, while maize required the least energy and provided the highest productivity. Wheat demonstrated intermediate values and ensured the most uniform particle size distribution. It was established that the diameter of sieve openings has a considerable influence on the amount of fine particles and dust formation. The results confirm that optimization of design parameters of hammer mills, particularly sieve geometry and working element configuration, allows improving energy efficiency, grinding quality, and operational reliability. The findings can be used to substantiate rational design solutions and to enhance the performance of hammer mills under production conditions.

Keywords: hammer mill; machine parts; cereal materials; grinding; energy efficiency; experimental studies; grinding quality; machine design; particle size distribution; mechanical engineering.

References

- [1] S. M. Hnitko, M. Ya. Buchynskyi, S. V. Popov, and Yu. A. Cherniavskyi, *Tekhnologichni mashyny* [Technological machines]. Kyiv, Ukraine: Lira-K Publ., 2020. (Ukr.)
- [2] Ye. A. Frolov, S. I. Kravchenko, S. V. Popov, and S. M. Hnitko, *Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia: monohrafiia* [Technological support of product quality in mechanical engineering: Monograph]. Poltava, Ukraine: NUPP Publ., 2019. (Ukr.)
- [3] S. V. Popov, Yu. V. Levchenko, Yu. O. Basova, and K. S. Popov, "Vyznachennia optymalnykh robochykh parametriv tekhnologichnoho obladnannia metodom ortohonalnoho planuvannia eksperymentu" ["Determination of optimal operating parameters of technological equipment by the method of orthogonal experimental design"], *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 2(139), pp. 130-137, 2023. doi: 10.32782/1995-0519.2023.2.15. (Ukr.)
- [4] O. I. Bilovod, S. V. Popov, and Yu. B. Skoriak, "Rozrobka ta doslidzhennia enerhooschadnoi molotkovoï drobarky" ["Development and research of an energy-saving hammer mill"], in *Proc. 7th Int. Sci.-Pract. Conf. «Technical Support of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex»*, Zaporizhzhia, Ukraine, Nov. 03–28, 2025, pp. 157-159. (Ukr.)
- [5] V. D. Rybalchenko, and O. M. Kostenko, "Vplyv konstruktivnykh parametriv robochykh orhaniv drobarky na protses podribnennia zerna" ["Influence of design parameters of crusher working bodies on the grain grinding process"], *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 4(141), pp. 138-145, 2023. doi: 10.32782/1995-0519.2023.4.17. (Ukr.)
- [6] I. M. Kupchuk, V. Yu. Vovk, and D. A. Datsiuk, "Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti tekhnichnoi modernizatsii pidhotovchoho etapu tekhnologichnoho protsesu vyrobnytstva etanolu" ["Assessment of economic efficiency of technical modernization of the preparatory stage of ethanol production"], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Khmelnytskyi National University*, no. 2(283), pp. 36-46, 2020. doi: 10.31891/2307-5732-2020-283-2-36-46. (Ukr.)
- [7] Ye. Kharchenko, A. Sharan, and O. Yermeeva, "Dependence of flour yield on moisture content of chickpea seeds," *Ukrainian Journal of Food Science*, vol. 12, no. 2, pp. 161–174, 2024. doi: 10.24263/2310-1008-2024-12-2-7.
- [8] O. V. Boltianskyi, and N. I. Boltianska, "Doslidzhenia dohovichnosti ta bezvidmovnosti pidsystem molotkovykh drobark v protsesi yikh ekspluatatsii" ["Investigation of durability and reliability of hammer mill subsystems during operation"], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva – Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture*, no. 156, pp. 636-640, 2015. (Ukr.)
- [9] G. Li, R. Roufail, B. Klein, L. Nordell, A. Kumar, C. Sun, and J. Kou, "Experimental evaluation of the conjugate anvil hammer mill – Comparison of semi-confined to confined particle breakage," *Minerals Engineering*, vol. 134, pp. 221-231, 2019. doi: 10.1016/j.mineng.2019.03.024.
- [10] A. Bochat, L. Wesołowski, and M. Zastempowski, "A comparative study of new and traditional designs of a hammer mill," *Transactions of the ASABE*, vol. 58,

- no. 6, pp. 1737-1746, 2015. doi: **10.13031/trans.58.10691**.
- [11] Y. Castillo-Alvarez, R. Jiménez Borges, A. Álvarez Hernández, J. Hernández Guillén, and G. Martínez González, "Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills and its use in the feed industry: analysis and validation in a case study in Cuba," *Processes*, vol. 13, no. 5, article 1523, 2025, doi: **10.3390/pr13051523**.
- [12] X. De, H. Li, J. Kang, and J. Yang, "Experimental study on the cutting and crushing performance of *Caragana korshinskii* strips," *Agriculture*, vol. 14, no. 9, article 1584, 2024. doi: **10.3390/agriculture14091584**.
- [13] D. L. Anh, N. A. Tuan, N. V. Hung, and T. Q. Thang, "Study on performance evaluation and optimization of brewers grains hammer mill," *AIP Conference Proceedings*, Ho Chi Minh City, Vietnam, April 9, 2021, vol. 2406, article 020003. doi: **10.1063/5.0066721**.
- [14] G. Paraschiv, G. Moiceanu, G. Voicu, M. Dinca, and E. Stefan, "Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, article 973, 2021. doi: **10.3390/su13020973**.
- [15] S. Naik, Y. Feng, and B. Chaudhuri, "Experiment and model-based investigation of comminution in a hammer mill," *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, vol. 2, no. 4, pp. 362-373, 2014. doi: **10.2495/CMEM-V2-N4-362-373**.
- [16] A. G. Chiaravalle, J. Piña, and I. Cotabarren, "DEM simulation of maize milling in a hammer mill," *Powder Technology*, vol. 431, article 120892, 2025. doi: **10.1016/j.powtec.2025.120892**.
- Стаття надійшла 02.01.2026
Стаття прийнята 30.01.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Попов С. В., Скоряк Ю. Б. Експериментальна оцінка ефективності конструкції молоткової дробарки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 170–177. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359806>.

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ
ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ
ДЛЯ ПОДОВЖЕННЯ ЇХ РЕСУРСУ****Зенкін М.А.***д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>, e-mail: nikolay.zenkin@ukr.net;***Ремезовський
О.М.***аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6064-9876>, e-mail: remez2024@outlook.com*

Метою дослідження є підвищення експлуатаційної стабільності та довговічності відповідальних деталей друкарського обладнання шляхом впровадження комбінованих технологій поверхневого зміцнення та відновлення. У центрі уваги перебувають друкарські циліндри, формні циліндри та анілоксові вали, що працюють у режимі циклічного контактного навантаження, інтенсивного тертя та впливу фарбових і зволожувальних систем. Дослідження виконано в умовах виробничої експлуатації із застосуванням профілометричного контролю, вимірювання мікротвердості, визначення коефіцієнта зносу k , коефіцієнта тертя μ та залишкових напружень σ_{res} . Отримані результати підтвердили, що поєднання поверхнево-пластичного деформування з функціональними покриттями формує стабільний приповерхневий шар із підвищеною опірністю контактній втоми та абразивному зношуванню. Після впровадження комбінованих технологій коефіцієнт зносу зменшується у 1,6–1,9 раз. Параметр R_a зберігається в межах встановленого допуску протягом тривалішого періоду роботи, що забезпечує стабільний контакт і рівномірне фарбоперенесення. Залишкові стискаючі напруження у приповерхневому шарі знижують швидкість розвитку мікротріщин і підвищують циклічну стійкість деталей. Для анілоксових валів встановлено збереження об'єму комірок із відхиленням не більше 3% за 1000 годин роботи. Це гарантує сталість подачі фарби та відсутність смугастості відбитка. Для формних циліндрів зафіксовано збільшення ресурсу зон затиску більш ніж удвічі. Зменшення коефіцієнта тертя на 20–25% призводить до зниження тепловиділення в зоні контакту та стабілізації динамічних параметрів машини. Практичне значення роботи полягає у створенні керованої технологічної схеми відновлення поверхонь без зміни конструкції вузлів. Результати дослідження дозволяють прогнозувати ресурс деталей на основі вимірюваних параметрів мікрогеометрії та трибологічних характеристик. Запропонований підхід забезпечує подовження міжремонтного інтервалу та підвищення надійності роботи друкарського обладнання у тривалих виробничих циклах.

Ключові слова: комбіноване поверхнeve зміцнення; друкарські циліндри; зносостійкість поверхні; контактна втома; залишкові напруження; трибологічні характеристики; подовження ресурсу експлуатації.

Постановка проблеми

Інтенсивність роботи сучасних друкарських машин постійно зростає. Збільшується швидкість обертання валів, підвищується точність суміщення, зменшуються допустимі відхилення у відбитку. За таких умов поверхні відповідальних деталей працюють у режимі високого контактного навантаження та безперервного тертя. Саме поверхневий шар визначає стабільність фарбоперенесення, рівномірність тиску та повторюваність тиражу. Втрата мікрогеометрії або поява локальних дефектів одразу впливають на якість продукції та надійність обладнання [1]. Традиційні методи відновлення не забезпечують тривалого результату, оскільки не формують керованої структури поверхневого шару. Це зумовлює потребу у впровадженні інтегрованих технологічних рішень.

Практика експлуатації свідчить, що більшість відмов пов'язана не з руйнуванням об'єму деталі, а з деградацією її поверхні. Поверхневий шар зазнає контактної втоми, абразивного зношування та корозійно-механічної дії технологічних середовищ. Відсутність узгодженої схеми комбінованого зміцнення призводить

до нестабільних результатів після ремонту. Потрібно сформулювати технологічний підхід, який забезпечить прогнозований ресурс, стабільні трибологічні параметри та довготривалу геометричну точність без зміни конструкції вузлів [2]. Саме це визначає напрям даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботі Бен Саїд Л. [1] наведені результати досліджень сучасних напрямів розвитку адитивного виробництва та його інтеграції у машинобудівні процеси. Показано, що поєднання технологій формування та постобробки відкриває можливості для створення деталей зі складною функціональною геометрією. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з довготривалою зносостійкістю поверхонь у реальних експлуатаційних умовах.

У дослідженні Дамьянович А. [3] наведені результати впливу плазмової обробки на механічні властивості та структуру поверхневого шару. Показано, що плазмова модифікація підвищує твердість і стабілізує мікроструктуру. Однак не визначено параметри

оптимальної інтеграції з іншими методами зміцнення. У роботах Хашмі А. В. [4] та Малекі Е. [5] показано ефективність постобробки для підвищення якості поверхні адитивно виготовлених деталей. Проте залишаються питання комплексного прогнозування ресурсу при циклічному контактному навантаженні. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з моделюванням трибологічних процесів та витратністю експериментальних досліджень. У публікації Канішка К. [6] проаналізовано методи відновлення зношених компонентів. Показано доцільність комбінованих підходів. Водночас недостатньо досліджено специфіку друкарських вузлів. У роботі Жигуля С. [7] доведено позитивний вплив інтегрованої обробки на друкарські циліндри. Проте не сформовано узгодженої технологічної схеми з прогнозованими параметрами напруженого стану.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого науковому обґрунтуванню комбінованих технологій поверхневого зміцнення для відповідальних деталей друкарського обладнання з урахуванням їх трибологічних і експлуатаційних характеристик.

Мета статті

Мета статті – дати інженерне обґрунтування щодо використання комбінованих методів поверхневого зміцнення і відновлення відповідальних деталей друкарського обладнання.

Матеріали та методи

Об'єктами дослідження були друкарські циліндри, формні циліндри та анілоксові вали зі сталей конструкційного призначення та з керамічними покриттями, що експлуатувалися в умовах промислового друку. Для формування зміцненого шару застосовували поверхнево-пластичне деформування, локальне механічне оброблення та нанесення функціональних покриттів гальванічним і плазмовим методами.

Оцінювання стану поверхні виконували за допомогою 3D-профілометрії з визначенням параметрів R_a і R_z . Мікротвердість вимірювали методом Віккерса при навантаженні 0,1–0,3 кгс. Залишкові напруження визначали методом рентгенівської дифракції. Трибологічні характеристики досліджували за схемою «кулька–диск» із розрахунком коефіцієнта тертя μ та коефіцієнта зносу k . Експлуатаційну ефективність оцінювали в умовах реальної виробничої роботи обладнання.

Виклад основного матеріалу

Ресурс друкарського обладнання обмежує стан робочих поверхонь. Машина може зберігати точність приводу, справність автоматики та стабільність подачі аркуша, але втратити якість відбитка через деградацію шару, який контактує з фарбою, зволожувальним розчином, полотном або папером. Поверхня працює на

межі допустимих режимів тертя. Вона приймає циклічний тиск, переносить зсувні напруження, взаємодіє з абразивом і реагує з компонентами технологічних рідин. Через це знос переходить у площину технологічної проблеми. Він змінює фарбоперенесення, викликає дефекти друку, збільшує час наладок і скорочує міжремонтний інтервал [8].

Найчастіше ресурс обмежують не руйнуванням тіла деталі, а втомою й корозією поверхневого шару. Цей шар накопичує пошкодження швидко, бо саме він несе контактне навантаження. Мікронерівності концентрують напруження у вершинах профілю. Під тиском вони зминаються, потім знову формуються, і кожен цикл залишає мікрослід. Далі в дію входить робоче середовище. Фарбові системи містять пігменти, наповнювачі та добавки, що поводяться як дрібний абразив. Зволожувальні розчини містять ПАР, солі та регулятори рН. Промивні засоби мають розчинники й поверхнево-активні компоненти, які підсилюють корозійні процеси в дефектних зонах. Так поверхня одночасно зазнає абразивного, адгезійного та корозійного зношення.

Першим індикатором проблеми стає мікрогеометрія. Оператор помічає нестійкість тону, смуги, плями, різницю насиченості по ширині аркуша. Технолог фіксує, що машина потребує частіших корекцій подачі фарби, тиску або зволоження. Інженер бачить ознаки деградації за параметрами R_a (середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості) і R_z (середня висота нерівностей профілю за десятьма точками), за появою локальних матових зон, за мікропітінгом і мікротріщинами [9]. При цьому навіть невелике підвищення R_a здатне змінити роботу контакту. Для друкарського циліндра перехід від R_a 0,4–0,5 мкм до 0,8–1,0 мкм вже формує зону ризику, бо поверхня втрачає рівномірність перенесення фарбової плівки і створює нестабільний контакт з полотном або парним циліндром. Коли до цього додається корозійне ураження, зміна стає лавиноподібною. Корозія формує кратери, кратери підсилюють локальний тиск, локальний тиск прискорює руйнування покриття або зміцненого шару [7].

Друкарський циліндр в офсетній машині працює у режимі високої циклічності. Він приймає контактний тиск в зоні друкарського контакту, передає зусилля через шар полотна, працює під впливом паперового пилю та абразивних домішок. Якщо машина друкує крейдовані папери або картон, абразивність середовища зростає. Якщо машина працює з частими зупинками й запуском, виникають додаткові термоконтрасти в зоні контакту та зростає ризик локального прихоплення [6]. За таких умов поверхня спочатку втрачає стабільність шорсткості, потім накопичує мікропластичні деформації, далі формує хвилястість і биття. Хвилястість не завжди видно візуально. Вона проявляється у зміні тиску по колу, у коливанні товщини фарбового шару, у повторюваних дефектах на відбитку з періодом оберт. Знайдений дефект важко «прибрати» наладкою, бо він

має механічну природу і походить з поверхневого шару.

Формний циліндр має інший профіль навантажень, але він також працює у зоні ресурсних обмежень. Він постійно контактує з друкарською формою та вузлами кріплення, а також працює в умовах змінного зволоження. Монтаж і демонтаж форм дає локальні контактні навантаження в зоні затискних планок. Там часто виникають задири й подряпини. Ці дефекти створюють концентратори напружень, а циклічний тиск у друкарській зоні розвиває їх до мікротріщин [10]. Далі тріщина «працює» як капіляр для технологічної рідини. Середовище проникає у дефект, прискорює корозію і збільшує зону ослаблення. Після цього поверхня втрачає рівномірність контакту з формою. Машина реагує на це нестабільним перенесенням растрової структури, появою місцевих втрат у півтонах та порушенням суміщення при багатофарбовому друку. У цій деталі критичною стає не тільки шорсткість, а й локальна геометрична точність у зоні контакту з формою. Навіть при прийнятному R_a формний циліндр може втратити ресурс через локальні дефекти в зоні кріплення або через нерівномірну корозію.

Анілоксовий вал у флексографії створює окремий клас проблем, бо він працює не просто як гладка поверхня, а як носій мікроструктури. Геометрія комірок визначає кількість фарби, що вал подає на друкарську форму. Втрата мікрогеометрії тут одразу трансформується у технологічний дефект. Згладжування країв комірок, замивання профілю, часткове руйнування мікрорельєфу та зростання забруднюваності зменшують ефективний об'єм фарбоперенесення. Якщо об'єм падає на 5–10%, машина дає помітну різницю насиченості. Якщо об'єм падає нерівномірно по ширині, виникає смугастість. Якщо комірки деформуються локально, проявляються плями та провали тону. У реальній експлуатації вал страждає ще й від очищення. Ультразвукове очищення та хімічні склади можуть прискорювати мікроруйнування поверхні, особливо коли оператор перевищує час впливу або застосовує агресивні засоби. Так формується конфлікт між вимогою чистоти комірок і вимогою збереження їх геометрії. Ресурс валу закінчується тоді, коли він вже не забезпечує повторювану подачу фарби, навіть якщо вал ще має «цілий» корпус (табл. 1).

Таблиця 1

Критичні експлуатаційні параметри зношування поверхонь відповідальних деталей друкарських машин та напрями подовження їх ресурсу

Деталь	Робоче навантаження	Тип деградації поверхні	Критичний показник	Напрямок подовження ресурсу
Друкарський циліндр	Контактний тиск 0,8–1,2 МПа, 10–15 тис. об/год	Абразивний та корозійний знос	$R_a > 0,8$ мкм	Формування регулярного мікрорельєфу та хромове покриття
Формний циліндр	Змінний тиск, вологе середовище	Втомне руйнування та мікротріщини	Поява локальних дефектів притиску	Поверхнево-пластичне деформування з наступним покриттям
Анілоксовий вал	Гідродинамічний контакт, очищення ультразвуком	Згладжування комірок, кавітація	Зменшення об'єму фарби $> 5\%$	Плазмове зміцнення або керамічне напilenня
Притискний вал	Постійне циклічне стискування	Локальна деформація покриття	Втрата геометрії контакту	Локальне зміцнення поверхні
Підшипникові шийки валів	Обертальне навантаження	Мікропітинг	Поява мікрораковин	Триботехнічна стабілізація
Затискні планки	Локальний механічний контакт	Подряпини та задири	Порушення фіксації форми	Лазерне згладжування
Напрямні вузли	Ковзання з мастилом	Адгезійний знос	Підвищення коефіцієнта тертя	Комбіноване механічне та електрохімічне зміцнення

Для цих деталей ресурс поверхні обмежений особливістю експлуатації. Друкарський циліндр «вбиває» комбінований абразивно-корозійний знос і контактна втома. Формний циліндр «вбивають» локальні механічні пошкодження в зоні кріплення та корозійна втома під дією вологи. Анілоксовий вал «вбиває» деградація мікрогеометрії комірок через тертя, замивання і вплив очищення.

Ефективність відновлення деталей визначає не окремий метод, а послідовність взаємопов'язаних технологічних операцій. Інтеграція комбінованих процесів формує

керований поверхневий шар із заданими механічними, геометричними та триботехнічними характеристиками [11].

Першим етапом інтеграції виступає формування стабільної базової геометрії. Поверхня після експлуатації має неоднорідний профіль із зонами локального пітингу, задири і корозійних кратерів. Просте шліфування створює новий слід обробки з глибиною риски, що може перевищувати 5–8 мкм. Подібний профіль зберігає концентрацію напружень у вершинах мікронерівностей. Тому інтегрований підхід передбачає попереднє вирівнювання із

контролем глибини зняття шару Δh не більше 0,05–0,08 мм для друкарських циліндрів середнього формату. Зменшення глибини зняття обмежує втрату базової жорсткості та мінімізує вплив на посадочні поверхні.

Після геометричної стабілізації застосовують поверхнево-пластичне деформування. Цей етап формує сприятливий розподіл залишкових стискаючих напружень $\sigma_{res} < 0$ у приповерхневому шарі. Інтенсивність зміцнення

оцінюють за зміною мікротвердості ΔHV та глибиною впливу h_s . Для сталей типу 40X або 38ХН3МА доцільно забезпечити приріст твердості не менше 12–18% у шарі товщиною 0,15–0,30 мм. Стискаючі напруження у межах –250...–400 МПа зменшують швидкість розвитку мікротріщин і стабілізують контактні зони. Характерний розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару наведено на рис. 1.

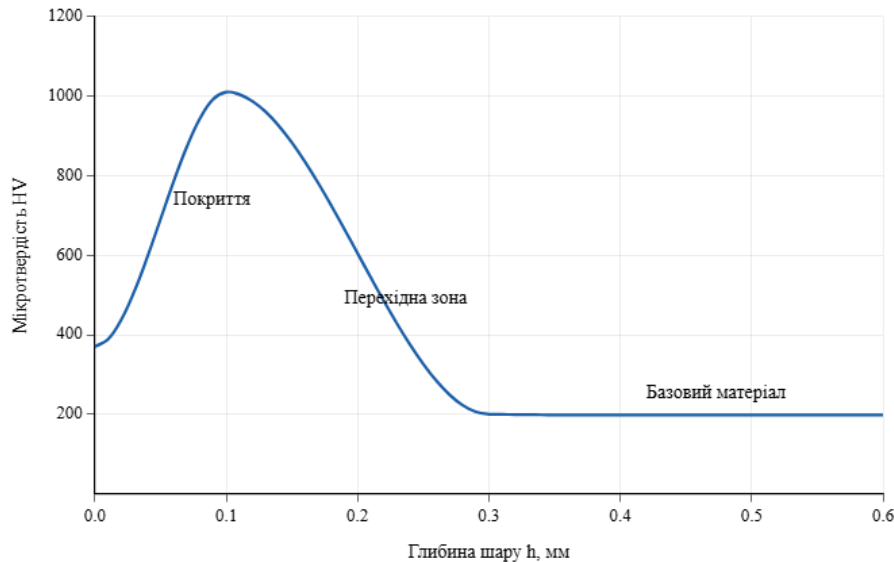


Рис. 1. – Розподіл мікротвердості HV по глибині поверхневого шару h після комбінованої обробки (покриття, перехідна зона, базовий матеріал)

Критичним є питання збереження контролю над параметрами мікрорельєфу. Після деформування профіль поверхні описують функцією $z(x)$, де інтегральний показник шорсткості визначають як:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx. \quad (1)$$

Завдання полягає не лише у зменшенні R_a , а у формуванні регулярної структури з однаковою амплітудою мікрорельєфів. Регулярний рельєф рівномірно розподіляє контактний тиск $p(x)$, що можна представити як:

$$p(x) = \frac{F}{A_{real}(x)}, \quad (2)$$

де:

A_{real} – реальна площа контакту. При хаотичному профілі площа контакту мінлива, що створює локальні перевантаження. Регуляризація рельєфу знижує пікові напруження та стабілізує коефіцієнт тертя μ [12].

Наступний етап інтеграції полягає у функціональному покритті. Проте нанесення шару без підготовленої підповерхневої структури не забезпечує тривалого ефекту. Адгезія покриття визначається як механічним зачепленням, так і дифузійною взаємодією на межі розділу. Критичне значення має коефіцієнт адгезії:

$$K_a = \frac{\tau_{adh}}{\sigma_{int}}, \quad (3)$$

де:

τ_{adh} – граничне напруження зсуву на межі;

σ_{int} – внутрішні напруження в покритті.

Підвищення K_a до значень понад 1,2–1,4 забезпечує відсутність відшарування при циклічному навантаженні.

Для друкарських циліндрів доцільним є поєднання пластичного зміцнення з гальванічним або плазмовим шаром товщиною 20–40 мкм. Такий шар виконує бар'єрну функцію проти корозії та стабілізує мікрорельєф. Для формних циліндрів важливо локально зміцнити зону затиску. Тут інтеграція передбачає спрямовану обробку вузької смуги шириною 10–15 мм із підвищенням твердості до 1,15–1,25 відносно базового рівня. Локалізація процесу запобігає надмірному впливу на баланс деталі [5].

Для забезпечення відтворюваних властивостей функціональних покриттів доцільно застосовувати контрольовані гальванічні та плазмові технології з чітко заданими режимами осадження. Гальванічне хромування виконують у сірчано-кислих електролітах при густині струму 30–60 А/дм² і температурі 50–60°C, що дозволяє формувати шар товщиною 20–40 мкм із твердістю до 900–1100 HV. Важливо забезпечити попередню активацію поверхні та стабільність катодного потенціалу для підвищення адгезії. Для плазмового напилення використовують газотермічні системи з температурою плазмового струменя 8000–12000 К і швидкістю частинок понад 500 м/с. Формування покриття здійснюється при дистанції 80–120 мм із контролем товщини шару δ та пористості не більше

2–4 %. Умови охолодження та швидкість подачі порошку визначають мікроструктуру шару і рівень залишкових напружень σ_{res} .

Інший принцип інтеграції стосується анілоксових валів. Зміцнення не повинно руйнувати мікрогеометрію комірок. Тому застосовують методи без значного зняття матеріалу. Плазмове модифікування або тонке керамічне напилення товщиною до 10–15 мкм дозволяє підвищити зносостійкість без зміни об'єму комірки [13]. Геометрію контролюють через параметр V_{cell} , що визначає об'єм фарби:

$$V_{cell} = S_{cell} \cdot h_{cell}, \quad (4)$$

де:

S_{cell} – площа поперечного перерізу;

h_{cell} – глибина комірки.

Збереження відхилення ΔV не більше 3% гарантує стабільність фарбоперенесення.

Комбінована інтеграція передбачає також контроль триботехнічних параметрів. Коефіцієнт тертя μ впливає на тепловиділення у зоні контакту. Тепловий потік q визначають як:

$$q = \mu \cdot p \cdot v, \quad (5)$$

де:

p – контактний тиск;

v – швидкість ковзання.

Зменшення μ на 0,05–0,08 знижує тепловиділення на 10–15%, що уповільнює термічну деградацію поверхневого шару.

Інтеграція методів потребує узгодження послідовності. Порушення черговості призводить до втрати ефекту. Якщо спочатку нанести покриття, а потім виконати пластичне деформування, виникне ризик мікротріщин у шарі. Якщо ж спочатку сформувати стискаючі напруження, а далі нанести функціональний шар, система працює стабільно. Отже, логіка інтеграції має порядок як геометрична стабілізація $\rightarrow$ пластичне зміцнення $\rightarrow$ контроль мікрорельєфу $\rightarrow$ нанесення функціонального шару $\rightarrow$ фінішна доводка.

Контроль профілю здійснюють за допомогою 3D-профілометрії з кроком сканування 1–5 мкм. Мікротвердість вимірюють за методом Віккерса при навантаженні 0,1–0,3 кгс. Трибологічні випробування проводять за схемою «кулька–диск» із питомим навантаженням 1–5Н для оцінки коефіцієнта зносу k :

$$k = \frac{V}{F \cdot s}, \quad (6)$$

де:

V – об'єм зношеного матеріалу;

F – навантаження;

s – шлях тертя.

Зменшення k у 1,5–2 рази свідчить про ефективність інтеграції. Технологічна інтеграція вимагає врахування конструктивних допусків. Для циліндрів діаметром 200–300 мм радіальне биття після обробки не повинно перевищувати 0,01 мм. Кожен етап зміцнення повинен мінімізувати тепловий і механічний вплив на геометрію.

Для деталей із високим контактним тиском пріоритетом стає зменшення концентрації напружень. Для деталей,

що контактують із хімічними середовищами, пріоритетом стає корозійна стабільність. Для деталей з мікроструктурою поверхні пріоритетом стає збереження геометрії [4].

Інтегрований підхід формує багат шаровий функціональний профіль. Підповерхневий шар несе стискаючі напруження. Середній шар стабілізує мікрогеометрію. Зовнішній шар забезпечує корозійну та зносостійку функцію. Така структура зменшує швидкість накопичення пошкоджень і підвищує опірність циклічним навантаженням [14].

Експлуатаційну стабільність оцінюють через динаміку зміни параметрів поверхні в часі. Якщо до модернізації R_a друкарського циліндра зростала з 0,45 до 0,90 мкм протягом 3–4 місяців роботи, то після інтегрованого зміцнення приріст не перевищує 0,10–0,15 мкм за аналогічний період. Це означає, що швидкість деградації профілю зменшується майже вдвічі. Контактний тиск у зоні друку визначають співвідношенням:

$$p = \frac{F}{A_{eff}}, \quad (7)$$

де:

F – прикладене зусилля;

A_{eff} – ефективна площа контакту.

Після комбінованої обробки A_{eff} зростає через вирівнювання мікронерівностей. Збільшення реальної площі контакту знижує пікові напруження, що безпосередньо впливає на опір контактній втомі. У практичних вимірюваннях це проявляється зменшенням глибини мікропітінгу з 8–10 мкм до 3–4 мкм за однакової кількості циклів навантаження (рис. 2).

Термічне напилення використовується для відновлення геометрії та формування зносостійкого поверхневого шару без суттєвого теплового впливу на базовий матеріал. Процес передбачає подачу порошкового або дріткового матеріалу в зону високотемпературного струменя, де частинки нагріваються до пластичного стану та прискорюються до швидкості понад 400–600 м/с. Осадження відбувається при ударі частинок об підготовлену поверхню з формуванням щільного шару товщиною $\delta = 0,1$ –0,4 мм. Адгезія забезпечується механічним зачепленням і частковою дифузєю. Контроль пористості (до 2–5%) і температури основи (не вище 200°C) дозволяє уникнути термічних деформацій та забезпечити стабільні експлуатаційні властивості покриття.

Друкарський циліндр після комбінованого зміцнення демонструє стабільніший коефіцієнт тертя μ . Якщо до обробки μ змінювався у межах 0,28–0,34 залежно від вологості та складу фарби, то після інтеграції технологій його коливання зводяться до 0,22–0,26. Зменшення амплітуди коливань означає стабілізацію теплового режиму [3]. Тепловиділення у зоні контакту визначають як:

$$Q = \mu \cdot F \cdot v. \quad (8)$$

де:

v – швидкість ковзання.

Зменшення μ на 0,06 при швидкості 2,5 м/с дає зниження теплового потоку приблизно на 15–18 %, що сповільнює термоциклічне руйнування поверхневого шару.



Рис. 2. – Візуалізована послідовність операцій відновлення поверхні окремої деталі від друкарського приладу (зображення згенеровано з авторського ескізу у цифровому середовищі Adobe Firefly)

Формний циліндр після локального зміцнення зони затиску демонструє іншу динаміку зносу. До модернізації мікротріщини у зоні фіксації форми з'являлися через 4–6 тисяч циклів монтажу. Після зміцнення цей показник зростає до 10–12 тисяч циклів. Пояснення полягає у зниженні коефіцієнта концентрації напружень K_t , який визначають як відношення максимального локального напруження до номінального [15]. Зменшення глибини мікрорізів у зоні контакту знижує K_t приблизно з 2,1 до 1,4, що суттєво сповільнює зародження втомних дефектів.

Анілоксовий вал після плазмового зміцнення або тонкошарового керамічного покриття зберігає геометрію комірок у стабільнішому режимі. Показник втрати об'єму комірки ΔV за 1000 годин роботи зменшується з 7–8% до 2–3%. Об'єм визначають як:

$$V = \frac{h \cdot S}{n}, \quad (9)$$

де:

h – глибина комірки;

S – площа перерізу;

n – кількість комірок на одиницю площі.

Збереження ΔV у межах 3% гарантує сталість фарбоперенесення і відсутність смугастості. Окрема увага прикута до стабільності залишкових напружень. Їх величину контролюють методом рентгенівської дифракції [16]. Після комбінованої обробки поверхня має стискаючий стан

σ_{res} у межах $-300 \dots -450$ МПа. Під час експлуатації цей показник поступово зменшується, але навіть після 6 місяців роботи залишається в інтервалі $-180 \dots -250$ МПа.

Експлуатаційна довговічність безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом зносу k , який визначають через об'єм втрат матеріалу:

$$k = \frac{\Delta V}{F \cdot s}, \quad (10)$$

де:

ΔV – об'єм зношеного шару;

s – шлях тертя.

Для друкарських циліндрів після інтегрованого зміцнення k знижується приблизно у 1,7 рази порівняно з традиційно відшліфованими поверхнями. Це означає, що при однаковому навантаженні деталь накопичує пошкодження значно повільніше (рис. 3).

Після впровадження комбінованих технологій змінюється і характер вібрацій вузлів. Амплітуда радіального биття друкарського циліндра зменшується з 0,012–0,015 мм до 0,006–0,008 мм.

Зменшення биття знижує динамічні навантаження на підшипникові опори, що додатково стабілізує систему [17]. У таблиці 2 наведено узагальнені показники стабільності та довговічності після інтеграції комбінованих технологій.



Рис. 3 – Модель поверхневого шару після комбінованого зміцнення з відображенням глибини зміцнення та розподілу залишкових напружень (зображення згенеровано з авторського ескізу у цифровому середовищі Adobe Firefly)

Таблиця 2

Інтегральні показники експлуатаційної стабільності друкарських деталей після комбінованого поверхневого зміцнення

Деталь	Контрольний параметр до впровадження	Параметр після впровадження	Динаміка зміни	Експлуатаційний ефект
1. Друкарський циліндр	R_a 0,85 мкм через 3 міс.	R_a 0,55 мкм через 3 міс.	зниження швидкості зростання R_a у 1,9 рази	стабільний тон, відсутність смуг
2. Формний циліндр	поява мікротріщин після 5 тис. циклів	після 11 тис. циклів	збільшення ресурсу у 2,2 рази	рівномірний притиск форми
3. Анілоксовий вал	$\Delta V = 7$ % за 1000 год	$\Delta V = 2,5$ % за 1000 год	зменшення втрат об'єму у 2,8 рази	стабільна насиченість відбитка
4. Підшипникові шийки	$k = 4,2 \cdot 10^{-6}$ мм ³ /Н·м	$k = 2,5 \cdot 10^{-6}$ мм ³ /Н·м	зниження коефіцієнта зносу у 1,7 рази	зменшення вібрацій
5. Затискні планки	задири через 3 міс.	задири через 7 міс.	подовження ресурсу у 2,3 рази	стабільна фіксація форми
6. Напрямні вузли	$\mu = 0,31$	$\mu = 0,23$	зниження тертя на 26 %	рівномірна подача аркуша

Отримані результати підтверджують, що комбінована обробка змінює не лише поверхневу твердість або шорсткість, а й кінетику руйнування шару. Поверхня переходить у режим уповільненого накопичення пошкоджень. Зменшення коефіцієнта зносу, стабілізація залишкових напружень та контроль мікрогеометрії формують довготривалий ефект.

Економічну ефективність впровадження комбінованих технологій доцільно оцінювати через інтегральний показник приведених витрат на одиницю напруцювання деталі. Базове співвідношення має вигляд:

$$E = \frac{C_{trad}}{T_{trad}} - \frac{C_{comb}}{T_{comb}}, \quad (11)$$

де:

C_{trad}, C_{comb} — сумарні витрати на відновлення традиційним та комбінованим методами;

T_{trad}, T_{comb} — відповідний ресурс експлуатації.

Додатково враховують втрати від простоїв C_{down} та витрати на обслуговування C_{serv} , що формує узагальнений критерій:

$$E_{tot} = \left(\frac{C_{trad} + C_{down}^{trad} + C_{serv}^{trad}}{T_{trad}} \right) - \left(\frac{C_{comb} + C_{down}^{comb} + C_{serv}^{comb}}{T_{comb}} \right). \quad (12)$$

Емпіричні дані свідчать, що збільшення ресурсу у 1,8–2,3 рази при зростанні вартості відновлення на 20–30 % забезпечує зниження питомих витрат на 25–40 %. Водночас скорочення частоти ремонтів зменшує непрямі втрати, пов'язані з простоєм обладнання, що для високошвидкісних друкарських машин має критичне

значення. Коефіцієнт економічної доцільності формується як:

$$K_e = \frac{T_{comb}/C_{comb}}{T_{trad}/C_{trad}} \quad (13)$$

Для більшості випадків перевищує 1,4–1,6, що підтверджує перевагу інтегрованого підходу. Таким чином, комбіновані технології забезпечують не лише технічний, але й стійкий економічний ефект за рахунок оптимізації життєвого циклу деталей.

Результати та їх обговорення

Проведені експериментальні дослідження засвідчили, що формування багатокомпонентного поверхневого шару суттєво змінює характер зношування деталей друкарських вузлів. Після поєднання пластичної деформації з нанесенням функціональних покриттів зафіксовано підвищення мікротвердості приповерхневого шару в середньому на 15–20% порівняно з вихідним станом. Одночасно відбулося зниження середнього коефіцієнта тертя, що позитивно вплинуло на тепловий режим контактних пар.

Аналіз профілометричних даних показав стабілізацію параметрів мікрогеометрії в процесі тривалої експлуатації. Інтенсивність зростання шорсткості зменшилась майже вдвічі, що свідчить про уповільнення деградації поверхневого шару. Для анілоксових валів встановлено збереження об'єму мікрокомірок у межах технологічного допуску протягом контрольного періоду роботи, що забезпечило рівномірність фарбопересення.

Рентгеноструктурний аналіз підтвердив формування стискаючих залишкових напружень, які перешкоджають розвитку мікротріщин. У результаті ресурс формних циліндрів у зоні затиску збільшився більш ніж удвічі. Порівняння експлуатаційних показників до і після модернізації продемонструвало зменшення коефіцієнта зносу в середньому у 1,7 раза.

Отримані результати свідчать, що комплексна технологічна схема не лише покращує окремі механічні характеристики, а й формує стабільний функціональний стан поверхні в умовах циклічного контактного навантаження. Це підтверджує доцільність застосування інтегрованого підходу для підвищення довговічності друкарського обладнання.

Висновки

Дослідження показало, що інтеграція методів пластичної деформації із нанесенням функціональних шарів створює більш рівномірний розподіл контактних навантажень і знижує максимальні значення локальних напружень. Результатом стає зменшення інтенсивності зношування та гальмування процесів утворення точкових пошкоджень на поверхні. Стабільна мікрогеометрія контролює фактичну площу взаємодії елементів і обмежує виділення теплоти в робочій зоні. Поверхневий шар функціонує в умовах сповільненого

руйнування, що безпосередньо визначає термін надійної роботи механізмів.

Експериментально підтверджено, що комбінація локального підвищення твердості з цілеспрямованим створенням залишкових напружень стиску збільшує стійкість до контактної втоми та корозійного руйнування під навантаженням. Зниження показника концентрації напружень у ділянках фіксації та взаємодії елементів зменшує ризик ініціювання тріщин і забезпечує стабільність геометричних параметрів компонентів.

Встановлено, що багатошарова функціональна архітектура поверхні створює комплексний ефект підвищення міцності, захисту від зовнішніх впливів та стабілізації характеристик тертя. Зменшення коефіцієнта тертя і постійність мікрорельєфу знижують рівень вібрацій і температурні флуктуації в контактних з'єднаннях. Збереження форми робочих елементів, включаючи поверхні з контрольованою мікроструктурою, забезпечує незмінність технологічних характеристик друку впродовж тривалого періоду використання.

Перелік використаних джерел

- [1] Recent advances in additive manufacturing: A review of current developments and future directions / Ben Said L., Ayadi B., Alharbi S., Dammak F. *Machines*. 2025. Vol. 13. No. 9. Article 813. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13090813>.
- [2] Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences. *Academy Review*. 2023. Vol. 2, no. 59. Pp. 75-89. DOI: <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5>.
- [3] The impact of plasma surface treatments on the mechanical properties and magnetic performance of FDM-printed NdFeB/PA12 magnets / A. Damjanović et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 10. Article 2275. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17102275>.
- [4] Hashmi A. W., Mali H. S., Meena A. A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2023. Vol. 29, no. 3. Pp. 504-532. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0133>.
- [5] Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities / Maleki E., Bagherifard S., Bandini M., Guagliano M. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 37. Article 101619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101619>.
- [6] Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 89. Pp. 220-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034>.
- [7] Zyhulia S., Barauskiene O. Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders. *Eastern-European Journal of Enterprise*

- Technologies*. 2019. Vol. 99, no. 3. Pp. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171808>.
- [8] Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach / V. Makedon et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 128, no. 2. Pp. 47-57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
- [9] Гаращенко Я. М. Удосконалення технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів. Харків, 2023. 388 с.
- [10] Sharma K. A modernization procedure for the maintenance of printing machinery. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, no. 5. Pp. 491-495.
- [11] Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment / Kepka M., Zetek M., Zetková I., Bakir Y. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. Pp. 59-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056>.
- [12] Rassokhin D. O., Nosovska O. V., Kokodey D. V. Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 170-176. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300054>.
- [13] Hashmi A. W., Mali H. S., Meena A. The surface quality improvement methods for FDM printed parts: A review. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Springer. 2021. Pp. 167-194. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_9.
- [14] Corrosion behavior of steel parts repaired using additive manufacturing: Overview and research perspective / Furbino M., Del Olmo R., Revilla R. I., De Graeve I. *Materials & Design*. 2025. Vol. 252. Article 113769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113769>.
- [15] Post-processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing / M. A. Mahmood et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 1. Article 77. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12010077>.
- [16] Surface treatment and analysis of 3D-printed plastic molds for prototype and small-series injection molding / Raz K., Chval Z., Hula F., Markopoulos A. *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 22. Article 2977. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17222977>.
- [17] Liu H., Xiao F., Gao Y. SiC powder binder jetting 3D printing technology: A review of high-performance SiC-based component fabrication and applications. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 12. Article 6488. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15126488>.

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF COMBINED SURFACE TREATMENT TECHNOLOGIES FOR CRITICAL PRINTING EQUIPMENT COMPONENTS TO EXTEND THEIR SERVICE LIFE

Zenkin M.A.

D.Sc. (Engineering), professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>, e-mail: nikolay.zenkin@ukr.net;

Remezovskyi O.M.

postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6064-9876>, e-mail: remez2024@outlook.com

The aim of the study is to enhance the operational stability and durability of critical printing equipment components through the implementation of combined surface strengthening and restoration technologies. The focus is placed on printing cylinders, plate cylinders, and anilox rollers operating under cyclic contact loading, intensive friction, and exposure to ink and dampening systems. The investigation was conducted under real production conditions using profilometric control, microhardness measurements, evaluation of the wear coefficient k , friction coefficient μ , and residual stresses σ_{res} . The results confirmed that the combination of surface plastic deformation and functional coatings forms a stable near-surface layer with increased resistance to contact fatigue and abrasive wear. After the implementation of combined technologies, the wear coefficient decreases by 1.6–1.9 times. The Ra parameter remains within the specified tolerance over a longer operating period, ensuring stable contact and uniform ink transfer. Compressive residual stresses in the near-surface layer reduce the rate of microcrack propagation and improve the cyclic durability of the components. For anilox rollers, preservation of cell volume with a deviation not exceeding 3% over 1000 operating hours was established. This guarantees consistent ink delivery and eliminates print streaking. For plate cylinders, the service life of clamping zones increases more than twofold. A reduction of the friction coefficient by 20–25% leads to lower heat generation in the contact zone and stabilization of the machine's dynamic parameters. The practical significance of the study lies in the development of a controlled technological scheme for surface restoration without altering the design of machine units. The results enable prediction of component service life based on measurable microgeometric and tribological parameters. The proposed approach ensures extension of maintenance intervals and improvement of printing equipment reliability during long-term production cycles.

Keywords: combined surface strengthening; printing cylinders; surface wear resistance; contact fatigue; residual stresses; tribological characteristics; service life extension.

References

- [1] L. Ben Said, B. Ayadi, S. Alharbi, and F. Dammak, "Recent advances in additive manufacturing: A review of current developments and future directions," *Machines*, vol. 13(9), article 813, 2025. doi: 10.3390/machines13090813.
- [2] V. V. Makedon, O. H. Kholod, and L. I. Yarmolenko, "The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences," *Academy Review*, vol. 2(59), pp. 75–89, 2023. doi: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
- [3] A. Damnjanović, G. Primc, R. Zaplotnik, M. Mozetič, and N. Kovačević, "The impact of plasma surface treatments on the mechanical properties and magnetic performance of FDM-printed NdFeB/PA12 magnets," *Materials*, vol. 17(10), article 2275, 2024. doi: 10.3390/ma17102275.
- [4] A. W. Hashmi, H. S. Mali, and A. Meena, "A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 29(3), pp. 504–532, 2023. doi: 10.1108/RPJ-06-2021-0133.
- [5] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, and M. Guagliano, "Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities," *Additive Manufacturing*, vol. 37, article 101619, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2020.101619.
- [6] K. Kanishka, and B. Acherjee, "A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 89, pp. 220–283, 2023. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.034.
- [7] S. Zyhulia, and O. Barauskiene, "Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3(12 (99)), pp. 22–28, 2019. doi: 10.15587/1729-4061.2019.171808.
- [8] V. Makedon, V. Myachin, O. Plakhotnik, N. Fisunen, and O. Mykhailenko, "Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 128(2), pp. 47–57, 2024. doi: 10.15587/1729-4061.2024.300796.
- [9] Ya. M. Harashchenko, *Udoskonalennia tekhnologichnoi pidgotovky adytyvnoho vyrobnytstva skladnykh vyrobiv: monohrafiia* [Improving technological preparation of additive manufacturing of complex products: monograph]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. (Ukr.)
- [10] K. Sharma, "A modernization procedure for the maintenance of printing machinery," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4(5), pp. 491–495, 2017.
- [11] M. Kepka, M. Zetek, I. Zetková, and Y. Bakir, "Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment," *Procedia Structural Integrity*, vol. 54, pp. 59–66, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.01.056.
- [12] D. O. Rassokhin, O. V. Nosovska, and D. V. Kokodey, "Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing," *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section Technical Sciences*, vol. 47, pp. 170–176, 2023. doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300054.
- [13] A. W. Hashmi, H. S. Mali, and A. Meena, "The surface quality improvement methods for FDM printed parts: A review," in *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, Springer, 2021, pp. 167–194. doi: 10.1007/978-3-030-68024-4_9.
- [14] M. Furbino, R. Del Olmo, R. I. Revilla, and I. De Graeve, "Corrosion behavior of steel parts repaired using additive manufacturing: Overview and research perspective," *Materials and Design*, vol. 252, article 113769, 2025. doi: 10.1016/j.matdes.2025.113769.
- [15] M. A. Mahmood, D. Chioibas, A. Ur Rehman, S. Mihai, and A. C. Popescu, "Post-processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing," *Metals*, vol. 12(1), article 77, 2022. doi: 10.3390/met12010077.
- [16] K. Raz, Z. Chval, F. Hula, and A. Markopoulos, "Surface treatment and analysis of 3D-printed plastic molds for prototype and small-series injection molding," *Polymers*, vol. 17(22), article 2977, 2025. doi: 10.3390/polym17222977.
- [17] H. Liu, F. Xiao, and Y. Gao, "SiC powder binder jetting 3D printing technology: A review of high-performance SiC-based component fabrication and applications," *Applied Sciences*, vol. 15(12), article 6488, 2025. doi: 10.3390/app15126488.

Стаття надійшла 04.02.2026

Стаття прийнята 28.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Zenkin M. A., Remezovskiy O. M. Наукове обґрунтування комбінованих технологій обробки поверхонь відповідальних деталей друкарського обладнання для подовження їх ресурсу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 178–187. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359807>.

УДК 66.081.6

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359808

НОВІТНІ ДОСЯГНЕННЯ В ДОСЛІДЖЕННІ ГІДРОДИНАМІКИ МЕМБРАННИХ КАНАЛІВ:
КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД

Ясенчук В.В.

аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1012-9475>, e-mail: Ivitaliy10@ukr.net;

Гулієнко С.В.

канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9042-870X>, e-mail: sergiigulienko@gmail.com

У цій оглядовій роботі систематизовано результати наукових досліджень 2015–2025 років, присвячених впливу геометричних параметрів спейсерів на експлуатаційні характеристики спіраль-но-намотаних мембранних модулів зворотного осмосу. Проаналізовано сучасні підходи до оптимізації конструкції спейсерів, зокрема застосування адитивних технологій (3D-друку), методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та експериментальних методик дослідження гідродинаміки, масопереносу й біообростання. Розглянуто вплив діаметра нитки, кута орієнтації сітки, висоти каналу, форми вузлів і просторової конфігурації (зокрема TPMS) на розподіл швидкостей, напружень зсуву та перепаду тиску. Підкреслено важливість пошуку компромісу між інтенсифікацією масопереносу та мінімізацією гідравлічних втрат. Особливу увагу приділено моделюванню процесів біообростання, яке є домінуючим типом забруднення мембран і тісно пов'язане з локальними гідродинамічними умовами в каналі, зокрема наявністю застійних зон. Узагальнено результати CFD-досліджень з проникними та непроникними граничними умовами, а також підходи до валідації чисельних моделей за допомогою експериментальних методів високої роздільної здатності (ОКТ, PIV). Показано перспективність використання 3D-друкованих і функціоналізованих спейсерів (антибактеріальні покриття, гідрофільні матеріали) для зменшення інтенсивності забруднення та підвищення енергоефективності мембранних систем. Також розглянуто активні методи контролю забруднення, такі як вібрація та обертання спейсерів, які дозволяють індукувати вторинні течії. Визначено ключові напрями подальших досліджень, зокрема багатомасштабне моделювання, комплексний опис взаємодії різних типів забруднення, оптимізацію геометрії з урахуванням енергетичних обмежень, а також розробку нових матеріалів і активних методів контролю біообростання. Отримані узагальнення формують наукову основу для створення енергоефективних і стійких до забруднення мембранних технологій нового покоління.

Ключові слова: мембрана біообростання; спейсер; 3D-друк; CFD-моделювання; зворотний осмос; концентраційна поляризація.

Постановка проблеми

Останніми роками популярність процесів зворотного осмосу (ЗО) стрімко зростає у зв'язку з глобальним дефіцитом прісної води, зростанням чисельності населення та посиленням нормативних вимог до якості води. Технології ЗО широко застосовуються для опріснення морської води, очищення стічних вод [1, 2], а також у харчовій промисловості, зокрема для концентрування харчових розчинів [3, 4].

У більшості промислових установок зворотного осмосу основною робочою одиницею є спіраль-но-намотаний мембранний модуль. Ефективність та продуктивність таких модулів значною мірою обмежуються гідродинамікою каналів живлення, умовами масообміну, розвитком концентраційної поляризації, а також процесами забруднення мембран, включаючи неорганічне, органічне та біологічне обростання [5]. Одним із найбільш перспективних інженерних підходів до мінімізації зазначених негативних явищ є оптимізація геометрії спейсерів [6, 7].

Спейсер є ключовим конструктивним елементом спіраль-но-намотаних мембранних модулів і відіграє визначальну роль у формуванні гідродинамічного режиму потоку, інтенсивності масообміну, величини

гідравлічного опору та характеру процесів забруднення [8, 9]. Конструктивно спейсер являє собою сітку, розміщену між двома мембранними листами, яка забезпечує формування міжмембранного каналу для руху розділювального розчину та сприяє турбулізації потоку, що, у свою чергу, зменшує прояви концентраційної поляризації. Водночас некоректно спроектована геометрія спейсера може призводити до істотного зростання гідравлічного опору, формування застійних зон і, як наслідок, інтенсифікації біообростання.

Таким чином, дослідження, присвячені конструкції та геометрії спейсерів, є критично важливими для підвищення ефективності мембранних ЗО-процесів.

Мета статті

Метою цієї оглядової роботи є аналіз сучасних наукових публікацій, присвячених дослідженню характеристик спейсерів та їх впливу на гідродинаміку, масоперенос, концентраційну поляризацію і процеси забруднення мембран у системах зворотного осмосу. Особливу увагу приділено впливу геометрії та розмірних параметрів спейсерів, а також застосуванню методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) і адитивних технологій у проектуванні мембранних модулів. У роботі

проаналізовано дослідження, опубліковані в період з 2015 по 2025 роки.

Матеріали та методи

Під час проведення огляду наукові публікації було систематизовано та згруповано відповідно до основної досліджуваної проблематики. Слід зазначити, що в окремих роботах одночасно розглядалося декілька підходів або аспектів впливу спейсерів на характеристики мембранних процесів, що унеможливило віднесення таких досліджень до однієї категорії. Такий підхід до класифікації дозволив структурувати наявні наукові результати, виокремити основні тенденції розвитку досліджень у галузі технологій спейсерів, а також ідентифікувати ключові наукові прогалини.

Для кращого розуміння функціональної ролі спейсерів доцільно коротко описати будову модуля. Спирально-намотаний мембранний модуль складається з мембранного пакету, який включає мембрани та дренажний матеріал для пермеату, а також спейсерів, що знаходяться між двома шарами мембран. Згорнуті шари утворюють канал для проходження вихідного розчину; пермеат видаляється через центральну трубку, а ретентат виходить з протилежного кінця модуля [10-12].

У живильних каналах зворотно-осмотичного мембранного модуля наявність спейсерів відіграє ключову роль у формуванні гідродинамічного режиму потоку. За рахунок інтенсифікації перемішування рідини спейсери сприяють покращенню масообміну та зменшенню проявів концентраційної поляризації поблизу поверхні мембрани [13], що робить їх невід'ємною складовою сучасних RO-модулів. Водночас застосування спейсерів неминуче супроводжується зростанням гідравлічних втрат і перепадом тиску вздовж модуля, що безпосередньо впливає на енергоспоживання процесу [14]. Таким чином, конструкція спейсера визначає компроміс між інтенсифікацією масопереносу та допустимими енергетичними витратами.

З огляду на суттєвий вплив геометрії спейсерів на структуру течії та масопереносні характеристики, модифікація їх конструкції залишається активним і перспективним напрямом наукових досліджень. Основні зусилля в цій галузі зосереджені на вирішенні трьох взаємопов'язаних завдань: підвищенні питомого потоку пермеату [15], зменшенні втрат тиску та енергоспоживання мембранних систем [16], а також зниженні інтенсивності забруднення мембран, індукованого спейсерами, зокрема у зонах з недостатнім перемішуванням рідини та формуванням застійних областей [17].

Виклад основного матеріалу

3D-моделювання та адитивні технології. 3D-моделювання та адитивні технології є одними з найбільш прогресивних інструментів у галузі мембранних технологій. Останніми роками спостерігається стрімке

зростання інтересу до тривимірного друку завдяки його значному потенціалу у проєктуванні та виготовленні спейсерів складної геометрії. На відміну від традиційних методів виробництва, 3D-друк дозволяє створювати як прості, так і високоскладні геометричні конфігурації, які практично неможливо реалізувати стандартними технологіями [18]. Це забезпечує точний контроль розміру пор, товщини елементів, шорсткості поверхні та конфігурації каналів, що безпосередньо впливає на проникність, селективність і протиобростаючі властивості мембранних систем. Додатковою перевагою 3D-друку є зменшення виробничих відходів під час виготовлення спейсерів [19], що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

Удосконалення технологій 3D-друку призвело до появи швидших і точніших принтерів із мікророзмірною роздільною здатністю (>1 мкм) [20]. Згідно з результатами, наведеними у [7, 9], 3D-друковані спейсери у ряді випадків перевершували комерційні аналоги, демонструючи інтенсифікований масообмін і знижену схильність до забруднення. Такі конструкції мають потенціал для зменшення енергоспоживання мембранних процесів за рахунок оптимізації гідродинаміки потоку.

Існує декілька підходів до моделювання та виготовлення тривимірної мікроструктури волокнистих середовищ. Зокрема, в роботі [21] розглядається метод електропрядіння, який є одноетапною технологією формування волокнистих матеріалів шляхом розчинення полімеру в хімічному розчиннику та подальшої електризації розчину під час подачі через голку. У статті [19] описано чотири основні технології 3D-друку, які застосовуються для виготовлення мембранних елементів: FDM (Fused Deposition Modeling), Selective Laser Sintering (SLS), Vat Photopolymerization та Sheet Lamination.

Технологія FDM широко використовується для виготовлення полімерних спейсерів завдяки простоті експлуатації та широкому вибору матеріалів, однак вона характеризується обмеженою роздільною здатністю та вираженою механічною анізотропією. SLS, у свою чергу, є придатною для створення складних полімерних і керамічних конструкцій без використання допоміжних матеріалів, проте потребує дорогого обладнання та тривалішого часу друку. Фотополімеризація в чанах (DLP, SLA) забезпечує мікронний рівень роздільної здатності, що є критично важливим для виготовлення детальних мембранних модулів, однак супроводжується проблемами механічної стійкості та обмеженою можливістю багатоматеріального друку. Розуміння зазначених технологічних компромісів є ключовим для вибору оптимального методу виготовлення спейсерів для конкретних застосувань.

Практичний потенціал 3D-друку продемонстровано, зокрема, у роботі [22], де за допомогою оптимізованої геометрії спейсера вдалося досягти більш рівномірного розподілу напруження зсуву на поверхні мембрани. Це сприяло зменшенню концентраційної

поляризації, інтенсивності забруднення та підвищенню ступеня відторгнення солей.

З урахуванням сучасного прогресу в галузі обчислювальної гідродинаміки та технологій 3D-друку значну частину обмежень, пов'язаних із проектуванням і виготовленням спейсерів складної геометрії, вже було подолано. Водночас на сьогодні зберігається помітна прогалина у дослідженнях, спрямованих на розробку спейсерів зі складними просторовими конфігураціями з використанням адитивних технологій. Подібні високоскладні прототипи, як правило, не можуть бути виготовлені у промислових масштабах традиційними методами виробництва. Це зумовлено тим, що 3D-друк спейсерних сіток вимагає надзвичайно високої роздільної здатності, зазвичай на рівні сотень мікронів [23], що призводить до значного зростання виробничих витрат і обмежує можливості масштабування.

З огляду на зазначені технологічні та економічні обмеження адитивного виробництва, CFD-моделювання часто є більш доцільним інструментом порівняно з експериментальними дослідженнями для прогнозування ефективності нових геометричних конфігурацій спейсерів. У зв'язку з цим у науковій літературі широко представлені числові дослідження складних геометрій спейсерів, зокрема структур на основі тричі періодичних мінімальних поверхонь (triply periodic minimal surfaces, TPMS) [24-28], перфорованих геометрій спейсерів [14], а також занурених спейсерів з колоноподібними вузлами [16, 17]. Застосування CFD-підходів у таких дослідженнях дозволяє детально аналізувати структуру течії, розподіли напружень зсуву та концентраційні поля, що є критично важливим для оцінки потенціалу нових конструктивних рішень.

Однією зі стратегій удосконалення геометрії спейсера є перфорація його ниток [14], яка може сприяти інтенсифікації потоку пермеату за одночасного зменшення перепаду тиску. Такий підхід наочно демонструє, що раціональна модифікація геометрії спейсера має безпосередній вплив на гідродинаміку каналу подачі, забезпечуючи не лише зниження гідравлічних витрат, але й покращення масообміну та потенційне зменшення схильності до забруднення.

В іншому дослідженні Алі та співавт. [16] показали, що занурена конструкція спейсера з колоноподібними вузлами має потенціал зменшення перепаду тиску приблизно до третини від значень, характерних для спейсерів із більшим діаметром ниток. Водночас базовий випадок, використаний у цьому дослідженні для порівняння, не відповідає типовій двошаровій геометрії спейсера, яка широко застосовується в комерційних спіральних-намотаних мембранних модулях. У зв'язку з цим ефективність запропонованої зануреної геометрії з колоноподібними вузлами у порівнянні зі стандартними промисловими конфігураціями спейсерів залишається відкритим науковим питанням.

Під час CFD-моделювання процесів мембранного розділення найчастіше застосовується програмне забезпечення ANSYS CFX [5, 6, 29-32], водночас

значного поширення в наукових дослідженнях набула і open-source платформа OpenFOAM [33], яка забезпечує високу гнучкість у реалізації складних фізичних моделей.

Розвиток 3D-друку створює підґрунтя для переходу до 4D-друку, який передбачає введення часової компоненти та формування динамічних мембранних структур, здатних змінювати форму або поверхневі властивості у відповідь на зовнішні подразники, такі як температура, pH або світлове випромінювання. Подібні підходи потенційно можуть революціонізувати контроль забруднення, створення самоочисних мембран і адаптивних фільтраційних процесів. Водночас обмеження у виборі матеріалів, доступності обладнання та високій вартості технологій зумовлюють необхідність подальших фундаментальних і прикладних досліджень перед їх широким промисловим впровадженням [19].

Чисельне моделювання гідродинаміки методом CFD. Обчислювальна гідродинаміка (CFD) є перевіреним і широко застосовуваним інструментом для систематичного вивчення гідродинаміки та явищ масопереносу всередині живильних каналів спіральних-намотаних мембранних модулів і використовується для аналізу потоків масообміну на мікроскопічному рівні [34]. CFD-моделювання пропонує зручний та інформативний спосіб візуалізації полів швидкостей, напружень зсуву та концентраційних градієнтів у мембранних каналах, заповнених спейсерами, що безпосередньо сприяє подальшому вдосконаленню конструкції модулів спіральних-намотаних мембранних модулів [35]. Типові CFD-моделі мембранних каналів розглядають довжинні масштаби порядку міліметрів, що дозволяє екстраполювати отримані результати для прогнозування продуктивності повномасштабних мембранних модулів.

Основними перешкодами до підвищення продуктивності мембранних систем залишаються тіні потоку, індуковані спейсерами, а також обмежена механічна стабільність, зумовлена конструкцією та геометрією модуля [36-38]. Додатково, через залежність процесів біообростання від гідродинамічних умов, температури та складу подачі, для підтримки стабільної продуктивності мембран необхідні часті цикли очищення [39-41]. Одним із підходів до зменшення забруднення є підвищення швидкості перехресного потоку і, відповідно, напруження зсуву стінки, оскільки це сприяє пригніченню накопичення забруднювальних відкладень [42, 43]. Проте максимально допустимі швидкості потоку в спіральних-намотаних мембранних модулях істотно обмежені геометрією каналу та конструктивними особливостями модуля, що знижує ефективність такого підходу з точки зору контролю забруднення та очищення. З точки зору геометрії мембрани, інтенсивність забруднення залежить від довжини мембранного елемента та змінюється вздовж осі модуля. Внаслідок тертя потоку індукується осьова втрата тиску, що призводить до зниження трансмембранного тиску від входу

до виходу модуля і, відповідно, до зменшення інтенсивності забруднення вздовж довжини мембрани [44].

На відміну від традиційних спейсерів, нові геометричні конфігурації, навіть за умов незначного зменшення зазору між каналами, можуть не формувати застійних зон і забезпечувати відносно високі напруження зсуву як на поверхні мембрани, так і на нитках спейсера. Це призводить до бажаного зменшення концентраційної поляризації та інтенсивності забруднення, а також впливає на поширені експлуатаційні проблеми забруднення та накипу [45, 46].

Для розв'язання математичної моделі складаються рівняння нерозривності, імпульсу та масопередачі всередині заповненого мембранного каналу [47]. У CFD-моделюванні мембранних процесів широко застосовуються як моделі проникної, так і непроникної стінки. Деякі дослідники використовували граничні умови непроникної стінки для отримання прийнятних результатів [48-52]. Така модель є односторонньо зв'язаною та суттєво зменшує нелінійні ефекти порівняно з моделлю проникної стінки. Джеральдес та Афонсо [53] запропонували узагальнений поправочний коефіцієнт для корекції коефіцієнтів масопереносу, отриманих у моделі непроникної стінки, із середньою похибкою 3,6% відносно повноцінних CFD-прогнозів. Результати добре узгоджуються з експериментальними даними [48, 49], демонструючи похибку на рівні близько 10%. Тох та ін. [52] запропонували багатомасштабну модель, яка поєднує локальне CFD-моделювання з великомасштабною моделлю RO-процесу. Окрема робота також присвячена порівняльному аналізу моделей проникної та непроникної стінки [54]. Показано, що обидва підходи здатні з високою точністю відтворювати основні фізичні параметри процесу (швидкість, тиск, масоперенос) з похибками в межах 2–9%.

З метою зменшення обчислювальних витрат CFD-дослідження процесів RO зазвичай обмежуються аналізом сторони подачі без явного врахування каналу пермеату. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки в каналі пермеату спостерігається дуже малий перепад тиску, а концентраційна поляризація є незначною. Тиск пермеату зазвичай приймається близьким до атмосферного, тому більшість CFD-досліджень зосереджуються на моделюванні течії та перенесення розчинених речовин на стороні подачі мембрани. У більшості робіт CFD-аналіз виконується для обмеженої частини модуля – однієї або декількох періодичних комірок. Для такого моделювання поля потоку та масообміну використовуються періодичні граничні умови в поєднанні з детальними обчисленнями на рівні елементарної комірки. Водночас у [55] було розроблено повноцінну 3D CFD-модель, яка дозволяє оцінити роль спейсерів подачі у повномасштабних спіральних-намотаних RO-модулях.

Зустрічаються наукові роботи, у яких для аналізу гідродинаміки в мембранних каналах використовується двовимірне CFD-моделювання. Так, у роботах [56-58] виконано 2D CFD-дослідження трьох типових

конфігурацій спейсерів. Двовимірні (2D) моделі відзначаються високою обчислювальною ефективністю та широко застосовуються на початкових етапах аналізу, однак вони суттєво обмежені у відтворенні реальної просторової геометрії спейсерів і не дозволяють коректно описувати тривимірні ефекти потоку, зокрема вторинні течії, вихрові структури та локальні зони інтенсифікації масопереносу. На відміну від цього, тривимірне (3D) CFD-моделювання забезпечує можливість урахування складних геометрій спейсерів, перетинів ниток, осевих елементів та локальних зон інтенсифікації турбулентності.

На момент написання роботи CFD-дослідження процесів зворотного осмосу були зосереджені переважно або на двовимірних нестационарних моделях [59-63], або на тривимірних стаціонарних моделях [64, 65]. Зокрема Швінге та Вайлі та ін. [58] провели 2D-моделювання і виявили, що напруження зсуву на стінці збільшується або шляхом зменшення відстані між спейсерами, або шляхом збільшення числа Рейнольдса. При тому ж числі Рейнольдса турбулентні сліди з'являлися легше шляхом зменшення критичного числа Рейнольдса (Re_{CR}), що було корисним для зменшення накопичення забруднюючих речовин на поверхні мембрани та для пом'якшення явища концентраційної поляризації ціною збільшення перепаду тиску на мембранному модулі, що додатково спричиняло збільшення споживання енергії. Ахмад та ін. [66] виконали CFD-моделювання спейсерних ниток круглого, трикутного та прямокутного перерізів за однакового трансмембранного тиску. Було встановлено, що круглі та трикутні нитки здатні генерувати вихрові структури за нижчих чисел Рейнольдса порівняно з прямокутними, а також характеризуються нижчим коефіцієнтом концентраційної поляризації за однакових гідродинамічних умов. Куцу та ін. [67] застосували нестационарну ламінарну модель потоку для CFD-моделювання гідродинаміки та масопереносу в діапазоні чисел Рейнольдса 70–740, зосередивши увагу на впливі внутрішніх кутів та кута нахилу ниток у різних конфігураціях спейсерів на структуру потоку в мембранному каналі. Руїс-Гарсія та Пестана [68] розробили двовимірну модель для опису концентраційної поляризації в мембранних елементах зворотного осмосу, однак у цій моделі не враховувався просторовий розподіл солей на поверхні мембрани в спіральній-намотаній модулі.

Для детальнішого аналізу впливу геометричних характеристик спейсерів на продуктивність мембран зворотного осмосу були розроблені тривимірні CFD-моделі. Абдельбакі та ін. [69] виконали CFD-аналіз мембранних модулів RO зі спейсерами постійного та змінного діаметра за різних значень вхідної солоності та чисел Рейнольдса, продемонструвавши, що використання спейсерів змінного діаметра сприяє зменшенню концентраційної поляризації. Тох та ін. [70] дослідили вплив перфорацій різного діаметра, кількості та розташування на традиційних живильних спейсерах на гідродинамічні та масопереносні характеристики каналу.

В статті [15] було досліджено чотири основних види спейсерів і їх вплив на водопроникність, концентраційну поляризацію та перепад тиску. На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що спейсери нетканного типу є ефективними для забезпечення високої продуктивності та зменшення ефекту концентраційної поляризації, проте характеризуються нижчою механічною міцністю, що обмежує їх застосування в умовах підвищених навантажень. Частково ткани структури демонструють збалансоване поєднання гідродинамічних і механічних характеристик, однак потребують ретельного індивідуального підбору залежно від конкретних умов експлуатації. Спейсери із середнім шаром доцільно застосовувати у випадках, де пріоритетом є мінімізація водного потоку та концентраційної поляризації, однак вони характеризуються нижчою гідравлічною ефективністю. Повністю ткани спейсери є оптимальними для роботи в режимах з високими потоками та низьким рівнем концентраційної поляризації, однак їх застосування обмежується високою вартістю та складністю технологічної обробки.

Також на динаміку рідин та масообмін має великий вплив зменшення зазору у вузьких мембранних каналах, заповнених новими спейсерами [71]. Дослідження та розробка спейсерів передусім включають їх детальні геометричні характеристики, які критично впливають на поле потоку та основні параметри процесу (тобто падіння тиску, поляризація концентрації). У дослідженні [72] чисельно проаналізовано чотири типи спейсерів подачі з однаковою товщиною, але різною шириною зазору між спейсером і мембраною. Отримані результати підтвердили визначальний вплив ширини зазору на розподіл напружень зсуву, структуру потоку та потенціал розвитку забруднення. У роботі [73] була зроблена спроба отримати уявлення про схеми потоку, створені в каналі живлення модулів із просторовими перешкодами, та їхній кінцевий вплив на напругу зсуву, масопередачу та відносну схильність до забруднення поверхонь двох мембран шляхом зміни відстані спейсера.

Для дослідження поведінки потоку в тривимірних живильних каналах, сформованих спейсерами [74], поряд із CFD застосовувалися експериментальні методи, зокрема велосиметрія зображення частинок [75] та мікроскопічні спостереження. Окремі дослідження також зосереджені на енергетичній оптимізації зворотно-осмотичних систем.

Біологічне забруднення та методи його контролю. Біологічне забруднення мембрани є однією з основних проблем у застосуванні зворотного осмосу (ЗО). Контроль забруднення мембран є ключовим фактором підтримки стабільної роботи ЗО-модулів [76]. Вплив геометрії спейсерів на гідродинамічний стан та утворення біообростання досі не повністю з'ясований, хоча існує багато досліджень у цій області. Серед усіх механізмів забруднення біообростання має найбільший вплив на продуктивність мембран через накопичення біомаси на їхній поверхні [77-79]. Забруднення

мембран традиційно класифікують на три типи: неорганічне (мінеральне), органічне та біологічне (біообростання) [72], проте саме біозабруднення суттєво впливає на експлуатаційні характеристики, зокрема на гідравлічний опір та зниження пермеатного потоку.

У чисельному моделюванні каналів РО-мембран особливу увагу приділяють різним типам моделей біообростання [77, 78, 80, 81]. Більшість двовимірних і тривимірних CFD-досліджень біообростання підтверджені експериментально [82-84], що підвищує довіру до прогнозів моделей. Механічні властивості біоплівки часто визначають поєднанням числового моделювання та експериментальних даних, отриманих за допомогою оптичної когерентної томографії (ОКТ). Експериментальні дослідження біомаси в каналах подачі мембранних модулів низького тиску були проведені з використанням ОКТ [85-86]. Цей метод забезпечує високоточну просторово-структурну інформацію щодо розподілу біомаси. Тривимірна реконструкція, виконана шляхом віднімання нульового часу сканування, дозволяє ізолювати виключно накопичену біомасу, що робить ОКТ ефективним інструментом для кількісної оцінки біообростання та перевірки ефективності стратегій його пом'якшення.

Окрім біообростання, у реальних умовах експлуатації систем зворотного осмосу інші типи забруднень, зокрема утворення накипу, твердофазні частинки та органічні відкладення, можуть виникати одночасно та взаємодіяти між собою [87]. Робота Радуга та ін. [88] присвячена чисельному моделюванню взаємодії між процесами утворення накипу та біообростання. Слід зазначити, що моделювання взаємодії між різними механізмами забруднення, а також впливу взаємодії між гідродинамікою та масообміном на ці процеси, є надзвичайно складним завданням. Основною причиною цього є обмежене розуміння фундаментальних механізмів, що лежать в основі таких взаємодій. У зв'язку з цим необхідні подальші дослідження в цьому напрямку.

Вплив на продуктивність мембрани залежить також від діаметра нитки спейсера: більший діаметр та менша товщина розпірки погіршують протиобростаючі характеристики, оскільки менший зазор між спейсером і мембраною може стимулювати локальне накопичення біомаси [89]. У роботі [72] наведено результати довготривалих (20-денних) експериментів з біообростання ЗО-мембран, що виконувалися за умов низького бактеріального навантаження та контрольованого дозування поживних речовин, імітуючи очищені міські стічні води. Було порівняно чотири спейсери однакової товщини, але різного діаметра ниток (0,40; 0,45; 0,55 та 0,60 мм). Відмінності в зазорі між спейсером і мембраною та пористості каналу подачі впливали на характер розвитку біообростання. Оптимізація геометрії спейсерів є критичною: підвищення напруження зсуву може зменшити початкове прикріплення мікроорганізмів, проте не гарантує контролю біообростання на пізніх стадіях. Геометрії, ефективні для контролю

неорганічного накипу, можуть бути недостатніми для обмеження біообростання. Важливими є попередня обробка живильного потоку, контроль бактеріального й поживного навантаження та моніторинг перепаду тиску для раннього виявлення прогресування біообростання. У роботі [90] показано, що інтенсифікація турбулентності потоку в каналах подачі сприяє зменшенню утворення неорганічних відкладень за рахунок скорочення часу перебування іонів поблизу мембранної поверхні та пригнічення росту кристалів. Водночас підкреслюється, що конструкція спейсера подачі повинна забезпечувати компроміс між зменшенням забруднення та зростанням гідралічного опору, оскільки збільшення турбулентності неминуче супроводжується підвищенням перепаду тиску і, відповідно, енергоспоживання.

Кількісна оцінка інтенсивності біообростання може здійснюватися різними методами. Наприклад, у роботах [91] індекс біообростання визначено як обернений час, необхідний для досягнення 100% відносного зростання перепаду тиску, що дозволяє інтерпретувати його як швидкість забруднення або частоту необхідного очищення. При цьому забруднення розглядається як надлишкове збільшення перепаду тиску, зумовлене зміною геометрії каналу внаслідок накопичення відкладень. Надмірне зростання перепаду тиску може призводити до витягування мембранних елементів та їх механічного пошкодження. Показано, що індекс біообростання безпосередньо корелює з об'ємом біомаси та є практично незалежним від прикладеної швидкості поперечного потоку, що робить його зручним інструментом для кількісного порівняння швидкості біообростання.

Ефективні стратегії зменшення забруднення включають:

- підвищення гідрофільності мембрани та спейсерів [92-94];
- використання функціоналізованих поверхонь, ковалентне прищеплення лігандів pQAs [95];
- активні методи контролю: обертання спейсерів [76], вібрація [96];
- барботування газу для інтенсифікації турбулентності та зменшення товщини прикордонного шару [97].

Окрім оптимізації геометрії спейсерів, ефективним підходом до зменшення забруднення є підвищення гідрофільності поверхні мембрани [98]. У низці робіт [99-101] описано модифікацію спейсерів за допомогою різних покриттів, зокрема ваніліну, pSBM, ZnO та срібла. Такі модифікації демонструють покращені антибактеріальні властивості, що пов'язують із підвищенням гідрофільності поверхні та кворум-гасильними (quorum quenching) ефектами. Важливу роль відіграють матеріали мембран: наприклад, мембрани з оксиду графену (GO) демонструють надзвичайну проникність і можуть зменшувати енергоспоживання процесу [102].

Для дослідження механізмів біообростання на мікрорівні також застосовуються методи молекулярної динаміки, які дозволяють моделювати процеси фазового розділення, адгезії та формування біоплівки. Серед активних методів контролю особливу увагу приділено динамічній механічній фільтрації. У роботі [76] запропоновано використання ротаційної спейсерної системи як активного методу контролю забруднення мембран. Ефективність запропонованого підходу було оцінено за допомогою моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD). Результати чисельного аналізу показали, що обертання спейсера індукуює вторинні течії поблизу поверхні мембрани, що призводить до зростання напруження зсуву та виникнення підйомних сил, які сприяють пригніченню адгезії забруднювальних частинок і видаленню відкладень з мембранної поверхні. Загалом досягнення динамічної механічної фільтрації можливе різними способами, зокрема шляхом обертання елементів модуля [103], вібрації [104] або зворотно-поступального руху мембранних модулів [105]. Серед зазначених підходів ротаційна спейсерна система розглядається як ефективний та енергоефективний метод контролю забруднення під час мембранної фільтрації. Обертання прокладки, розташованої між двома суміжними мембранними панелями, формує вторинний потік живильної рідини, який накладає додаткові зсувні та підйомні сили на забруднення, забезпечуючи очищення мембранної поверхні.

Аналіз досліджень, присвячених вібраційним 3D-спейсерам, дозволяє виділити три ключові аспекти. По-перше, як геометрія, так і орієнтація спейсерів істотно впливають на ефективність пом'якшення забруднення, як показано в [104]. Зокрема, хвилеподібні структури демонструють кращі характеристики порівняно з пагорбоподібними, а хвилеподібні виступи, орієнтовані перпендикулярно до напрямку вібрації, є ефективнішими, ніж паралельно орієнтовані. По-друге, наявність перфорацій у 3D-спейсерах не забезпечувала помітного покращення продуктивності за низьких потоків пермеату. Це пояснюється тим, що за умов помірного забруднення неперфорований спейсер уже забезпечує достатній гідродинамічний вплив, і додаткові перфорації не призводять до суттєвого посилення ефекту очищення. По-третє, за вищих потоків пермеату розмір та щільність перфорацій відіграють визначальну роль. Було показано, що менші перфорації забезпечують найкращу ефективність пом'якшення забруднення за інтенсивніших режимів фільтрації, тоді як спейсери з більшими перфораціями не демонстрували переваг порівняно з неперфорованими конструкціями в усьому дослідженому діапазоні потоків. Загалом отримані результати свідчать про те, що вібраційні 3D-спейсери є перспективним рішенням для енергоефективного контролю забруднення мембран, особливо за високих потоків пермеату. Як зазначено в [106], на експлуатаційні характеристики таких систем додатково впливають частота та амплітуда вібрацій, а також режим їх переривчастості. Покращення продуктивності

мембран у цьому випадку пояснюється комбінованим ефектом підвищення кінетичної енергії турбулентності, що сприяє зворотному транспорту забруднення від мембранної поверхні, та збільшенням напруження зсуву на межі «мембрана–розчин».

Висновки

Проведений аналіз сучасних експериментальних і чисельних досліджень свідчить, що геометрія, матеріал та функціональні властивості спейсерів відіграють визначальну роль у формуванні гідродинаміки, масопереносу, концентраційної поляризації та процесів забруднення в спіральні-навитих мембранних модулях зворотного осмосу. Застосування CFD-моделювання дозволило детально охарактеризувати локальні структури потоку, розподіл напружень зсуву та зони застою, які безпосередньо пов'язані з інтенсифікацією біообростання та зростанням гідравлічних втрат.

Аналіз літературних джерел показав, що оптимізація геометрії спейсерів (діаметр ниток, зазор між мембраною та спейсером, орієнтація сітки, форма вузлів) дозволяє суттєво підвищити питомий потік пермату та зменшити прояви концентраційної поляризації, однак зазвичай супроводжується зростанням перепаду тиску. Біообростання є домінуючим типом забруднення мембран RO і найбільш чутливе до локальних гідродинамічних умов, зокрема напружень зсуву та наявності зон застою. CFD-моделі з проникною та непроникною стінкою здатні з високою точністю відтворювати основні гідродинамічні та масообмінні характеристики, причому модель непроникної стінки залишається ефективним інструментом для зниження обчислювальних витрат. Новітні 3D-друковані та функціоналізовані спейсери демонструють значний потенціал щодо зменшення забруднення та енергоспоживання, особливо за рахунок складних просторових геометрій і цілеспрямованого керування турбулентністю.

На основі огляду можна виділити такі пріоритетні напрями майбутніх досліджень:

- Багатомасштабне CFD-моделювання, яке поєднує локальні (мікрометрові) процеси біообростання з повномасштабною гідродинамікою спіральні-навитих модулів.
- Комплексне моделювання забруднення, що враховує одночасну взаємодію біообростання, неорганічного накипу та органічних відкладень у реальних умовах експлуатації.
- Оптимізація геометрії спейсерів із урахуванням компромісу між зменшенням забруднення та мінімізацією гідравлічних втрат і енергоспоживання.
- Розробка та валідація нових матеріалів і покриттів спейсерів, зокрема антибактеріальних, гідрофільних та нанокомпозитних, із довготривалою стабільністю властивостей.
- Інтеграція активних методів контролю забруднення (вібрація, обертання, барботування газу) з оптимізованими конструкціями спейсерів.

Попри значний прогрес у цій галузі, низка важливих питань залишається відкритою. Зокрема: фундаментальні механізми взаємодії між різними типами забруднення та їх зв'язок із локальною гідродинамікою все ще недостатньо зрозумілі; більшість CFD-досліджень обмежується моделями окремих комірок, що ускладнює пряме перенесення результатів на повномасштабні модулі; існує дефіцит довготривалих експериментальних даних, придатних для валідації чисельних моделей біообростання та деградації спейсерів; довготривала механічна та хімічна стабільність функціоналізованих і 3D-друкованих спейсерів у реальних умовах експлуатації залишається недостатньо дослідженою.

Узагальнюючи, подальший розвиток мембранних систем зворотного осмосу потребує міждисциплінарного підходу, що поєднує CFD-моделювання, експериментальні методи високої роздільної здатності та інженерну оптимізацію матеріалів і конструкцій спейсерів. Саме такий підхід є ключем до створення енергоефективних, стійких до забруднення та економічно конкурентоспроможних мембранних технологій нового покоління.

Фінансування та подяки

Автори висловлюють подяку Збройним Силам України, Національній гвардії, Територіальній обороні та добровольцям за забезпечення безпеки під час виконання цієї роботи. Ця робота стала можливою лише завдяки стійкості та мужності Української армії. Ми також хотіли б подякувати міжнародним партнерам України, які не залишають Україну наодинці перед обличчям російської агресії.

Перелік використаних джерел

- [1] Najdawi F. Z., Neptune K. T. Optimizing Reverse Osmosis Membrane Parameters through the Use of the Solution-Diffusion Model: A Review. *Engineering*. 2022. Vol. 14. Pp. 9–32. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2022.141002>.
- [2] Supercomputing and Machine Learning-Aided Optimal Design of High Permeability Seawater Reverse Osmosis Membrane Systems/ Luo J., Li M., Hoek E. M. V., Heng Y. *Science Bulletin*. 2023. Vol. 68, iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.01.039>.
- [3] Bhattacharjee C., Saxena V.K., Dutta S. Fruit Juice Processing Using Membrane Technology: A Review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017. Vol. 43. Pp. 136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>.
- [4] Sarbatly R., Sariau J., Krishnaiah D. Recent Developments of Membrane Technology in the Clarification and Concentration of Fruit Juices. *Food Engineering Reviews*. 2023. Vol. 15. Pp. 420–437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09346-2>.

- [5] Foo K., Liang Y. Y., Weihs G. A. F. CFD Study of the Effect of SWM Feed Spacer Geometry on Mass Transfer Enhancement Driven by Forced Transient Slip Velocity. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 597. Article 117643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117643>.
- [6] Liang Y. Y., Toh K. Y., Fimbres Weihs G. A. 3D CFD Study of the Effect of Multi-Layer Spacers on Membrane Performance Under Steady Flow. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 580. Pp. 256–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.015>.
- [7] 3D Printed Nanofiltration Membrane Technology for Waste Water Distillation/ S.B. Khan et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 49. Article 102958. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102958>.
- [8] Park C., Kim J.-O. Performance of Biofouling Mitigating Feed Spacer by Surface Modification Using Quorum Sensing Inhibitor. *Desalination*. 2022. Vol. 538. Article 115904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115904>.
- [9] Atkinson S. Spacer Patterns Are Printed Directly onto Membranes. *Membrane Technology*. 2021. Vol. 2021. No. 11. Article 7. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0958-2118\(21\)00174-9](https://doi.org/10.1016/s0958-2118(21)00174-9).
- [10] Hulienko S. V., Yasenchuk V. V., Protsiuk M. O. Refined Assessment of the Impact of Membrane Module Channel Curvature on Pressure Drop. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2025. Vol. 29, no. 1. Pp. 55–72. DOI: <https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.310>.
- [11] Enhanced Mass Transfer and Energy Efficiency by a Biomimetic Feed Spacer in Reverse Osmosis Membrane Modules/ X. Hu et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. Vol. 713. Article 123290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123290>.
- [12] Synergistically Controlling Biofouling and Improving Membrane Module Permeability by Using Simultaneously Structurally Optimized and Surface Modified Feed Spacers / S. Yang et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. Vol. 708. Article 123046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123046>.
- [13] Kavianipour O., Ingram G. D., Vuthaluru H. B. Studies into the Mass Transfer and Energy Consumption of Commercial Feed Spacers for RO Membrane Modules Using CFD: Effectiveness of Performance Measures. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. Vol. 141. Pp. 328–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.041>.
- [14] Fouling Resilient Perforated Feed Spacers for Membrane Filtration / Kerdi S., A. Qamar, Vrouwenvelder J. S., Ghaffour N. *Water Research*. 2018. Vol. 140. Pp. 211–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.049>.
- [15] The Effect of Feed Spacer Geometry on Membrane Performance and Concentration Polarisation Based on 3D CFD Simulations / Gu B., Adjiman C. S., Xu X. Y. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. Pp. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058>.
- [16] Energy Efficient 3D Printed Column Type Feed Spacer for Membrane Filtration / S.M. Ali et al. *Water Research*. 2019. Vol. 164. Article 114961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114961>.
- [17] Koutsou C. P., Karabelas A. J. A Novel Retentate Spacer Geometry for Improved Spiral Wound Membrane (SWM) Module Performance. *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 488. Pp. 129–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.064>.
- [18] 3D Printing for Membrane Separation, Desalination and Water Treatment/ L.D. Tijting et al. *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 18. Article 100486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100486>.
- [19] 3D-Printed Materials for Wastewater Treatment. S. Roy Barman et al. *JACS Au*. 2023. Vol. 3, iss. 11. Pp. 2930–2947. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00409>.
- [20] Ibrahim Y., Hilal N. The Potentials of 3D-Printed Feed Spacers in Reducing the Environmental Footprint of Membrane Separation Processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Article 109249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109249>.
- [21] Yousefi S. H., Vahedi Tafreshi H. Modeling Electrospun Fibrous Structures with Embedded Spacer Particles: Application to Aerosol Filtration. *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 235. Article 116184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116184>.
- [22] Bio-Mimetically Inspired 3D-Printed Honeycombed Support (Spacer) for the Reduction of Reverse Solute Flux and Fouling of Osmotic Energy Driven Membranes / Yanar N., Son M., Park H., Choi H. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. Vol. 83. Pp. 343–350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.007>.
- [23] The Potential to Enhance Membrane Module Design with 3D Printing Technology/ J.-Y. Lee et al. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 499. Pp. 480–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008>.
- [24] 3D Printed Feed Spacers Based on Triply Periodic Minimal Surfaces for Flux Enhancement and Biofouling Mitigation in RO and UF / N. Sreedhar et al. *Desalination*. 2018. Vol. 425. Pp. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.010>.
- [25] 3D Printed Spacers Based on TPMS Architectures for Scaling Control in Membrane Distillation/ N. Thomas et al. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 581. Pp. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.039>.
- [26] Mass Transfer Analysis of Ultrafiltration Using Spacers Based on Triply Periodic Minimal Surfaces: Effects of Spacer Design, Directionality and Voidage / N. Sreedhar et al. *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 561. Pp. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.028>.

- [27] 3D Printed Triply Periodic Minimal Surfaces as Spacers for Enhanced Heat and Mass Transfer in Membrane Distillation / N. Thomas et al. *Desalination*. 2018. Vol. 443. Pp. 256–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.009>.
- [28] 3D Printed Spacers for Organic Fouling Mitigation in Membrane Distillation/ E. H. C. Castillo et al. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 581. Pp. 331–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.040>.
- [29] CFD Study of the Effect of Perforated Spacer on Pressure Loss and Mass Transfer in Spacer-Filled Membrane Channels / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fletcher D. F. *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 222. Article 115704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115704>.
- [30] CFD Prediction of Flow, Heat and Mass Transfer in Woven Spacer-Filled Channels for Membrane Processes / I. E. Mokhtar et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 173. Article 121246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246>.
- [31] Coupled Effects of Circular and Elliptical Feed Spacers under Forced-Slip on Viscous Dissipation and Mass Transfer Enhancement Based on CFD / K. Foo et al. *Journal of Membrane Science*. 2021. Vol. 637. Article 119599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119599>.
- [32] Liang Y. Y., Fimbres Weihs G. A., Wiley D. E. Comparison of Oscillating Flow and Slip Velocity Mass Transfer Enhancement in Spacer-Filled Membrane Channels: CFD Analysis and Validation. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 593. Article 117433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117433>.
- [33] Designing Centrifugal Membrane Filters with Uniform Pressure for UF/NF/RO Separations / V. Gerdal et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. P. 122752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752>.
- [34] Koutsou C. P., Karabelas A. J., Kostoglou M. Membrane Desalination under Constant Water Recovery – The Effect of Module Design Parameters on System Performance. *Separation and Purification Technology*. 2015. Vol. 147. Pp. 90–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.012>.
- [35] A Review of CFD Modelling and Performance Metrics for Osmotic Membrane Processes / K. Y. Toh et al. *Membranes*. 2020. Vol. 10. No. 10. Article 285. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10100285>.
- [36] Increasing Performance of Spiral-Wound Modules (SWMs) by Improving Stability against Axial Pressure Drop and Utilising Pulsed Flow / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fimbres Weihs G. A. *Membranes*. 2023. Vol. 13. No. 9. Article 791. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13090791>.
- [37] CFD Investigation of the Effect of the Feed Spacer on Hydrodynamics in Spiral Wound Membrane Modules / Han Z., Terashima M., Liu B., Yasui H. *Mathematical and Computational Applications*. 2018. Vol. 23, no. 4. Article 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/mca23040080>.
- [38] Kavianipour O., Ingram G. D., Vuthaluru H. B. Investigation into the Effectiveness of Feed Spacer Configurations for Reverse Osmosis Membrane Modules Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 526. Pp. 156–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.034>.
- [39] Schiffer S., Kulozik U. Effect of Temperature-Dependent Bacterial Growth during Milk Protein Fractionation by Means of 0.1 μm Microfiltration on the Length of Possible Production Cycle Times. *Membranes*. 2020. Vol. 10. No. 11. Article 326. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10110326>.
- [40] Influence of Feed Temperature on Biofouling of Ultrafiltration Membrane during Skim Milk Processing / J. Chamberland et al. *International Dairy Journal*. 2019. Vol. 93. Pp. 99–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.02.005>.
- [41] Microbial Biofilms in the Food Industry – A Comprehensive Review / C. Carrascosa et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, no. 4. Article 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18042014>.
- [42] Qiu T. Y., Davies P. A. Concentration Polarization Model of Spiral-Wound Membrane Modules with Application to Batch-Mode RO. Desalination of Brackish Water. *Desalination*. 2015. Vol. 368. Pp. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.048>.
- [43] Spatial Heterogeneity of Biofouling under Different Cross-Flow Velocities in Reverse Osmosis Membrane Systems / N. M. Farhat et al. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 520. Pp. 964–971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.08.065>.
- [44] Milk Protein Fractionation by Custom-Made Prototypes of Spiral-Wound Microfiltration Membranes Operated at Extreme Crossflow Velocities / M. Hartinger et al. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 605. Article 118110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118110>.
- [45] A Review of Efforts to Reduce Membrane Fouling by Control of Feed Spacer Characteristics / Abid H. S., Johnson D. J., Hashaikeh R., Hilal N. *Desalination*. 2017. Vol. 420. Pp. 384–402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.019>.
- [46] Effect of Different Commercial Feed Spacers on Biofouling of Reverse Osmosis Membrane Systems: A Numerical Study / S. S. Bucs et al. *Desalination*. 2014. Vol. 343. Pp. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.007>.
- [47] A Study of Flow Field and Concentration Polarization Evolution in Membrane Channels with Two-Dimensional Spacers during Water Desalination / M. Amokrane et al. *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 477. Pp. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.029>.

- [48] Koutsou C. P., Yiantsios S. G., Karabelas A. J. A Numerical and Experimental Study of Mass Transfer in Spacer-Filled Channels: Effects of Spacer Geometrical Characteristics and Schmidt Number. *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 326, no. 1. Pp. 234–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.10.007>.
- [49] Completo C., Semiao V., Geraldes V. Efficient CFD-Based Method for Designing Cross-Flow Nanofiltration Small Devices. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 500. Pp. 190–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.012>.
- [50] Fimbres-Weihs G. A., Wiley D. E. Numerical Study of Mass Transfer in Three-Dimensional Spacer-Filled Narrow Channels with Steady Flow. *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 306. No. 1–2. Pp. 228–243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.08.043>.
- [51] Shakaib M., Hasani S. M. F., Mahmood M. CFD Modeling for Flow and Mass Transfer in Spacer-Obstructed Membrane Feed Channels. *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 326, no. 2. Pp. 270–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.09.052>.
- [52] The Techno-Economic Case for Coupling Advanced Spacers to High-Permeance RO Membranes for Desalination / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fimbres Weihs G. A. *Desalination*. 2020. Vol. 491. Article 114534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114534>.
- [53] Geraldes V., Afonso M. D. Generalized Mass-Transfer Correction Factor for Nanofiltration and Reverse Osmosis. *AIChE Journal*. 2006. Vol. 52, no. 10. Pp. 3353–3362. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10968>.
- [54] Multiscale Analysis of Permeable and Impermeable Wall Models for Seawater Reverse Osmosis Desalination / Yang Q., Heng Y., Jiang Y., Luo J. *Separations*. 2023. Vol. 10, no. 2. Article 134. DOI: <https://doi.org/10.3390/separations10020134>.
- [55] Analysis of Concentration Polarisation in Full-Size Spiral Wound Reverse Osmosis Membranes Using Computational Fluid Dynamics / W. Wei et al. *Membranes*. 2021. Vol. 11, no. 5. Article 353. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes11050353>.
- [56] Estimation of Foulant Deposition across the Leaf of a Spiral-Wound Module / Schwinge J., Neal P. R., Wiley D. E., Fane A. G. *Desalination*. 2002. Vol. 146. No. 1–3. Pp. 203–208. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00471-X).
- [57] Schwinge J., Wiley D. E., Fletcher D. F. A CFD Study of Unsteady Flow in Narrow Spacer-Filled Channels for Spiral-Wound Membrane Modules. *Desalination*. 2002. Vol. 146, no. 1–3. Pp. 195–201. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00470-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00470-8).
- [58] Schwinge J., Wiley D. E., Fletcher D. F. Simulation of Unsteady Flow and Vortex Shedding for Narrow Spacer-Filled Channels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2003. Vol. 42, no. 20. Pp. 4962–4977. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie030211n>.
- [59] Liang Y. Y., Fimbres Weihs G. A., Fletcher D. F. CFD Study of the Effect of Unsteady Slip Velocity Waveform on Shear Stress in Membrane Systems. *Chemical Engineering Science*. 2018. Vol. 192. Pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.009>.
- [60] CFD Modelling of Unsteady Electro-Osmotic Permeate Flux Enhancement in Membrane Systems / Liang Y. Y., Fimbres Weihs G., Setiawan R., Wiley D. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 146. Pp. 189–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.028>.
- [61] Liang Y. Y., Fimbres Weihs G. A., Wiley D. E. CFD modelling of electro-osmotic permeate flux enhancement in spacer-filled membrane channels. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 507. Pp. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.012>.
- [62] Concentration polarization and permeate flux variation in a vibration enhanced reverse osmosis membrane module / Su X., Li W., Palazzolo A., Ahmed S. *Desalination*. 2018. Vol. 433. Pp. 75–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.001>.
- [63] Permeate flux increase by colloidal fouling control in a vibration enhanced reverse osmosis membrane desalination system / Su X., Li W., Palazzolo A., Ahmed S. *Desalination*. 2019. Vol. 453. Pp. 22–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.003>.
- [64] Evaluation and minimisation of energy consumption in a medium-scale reverse osmosis brackish water desalination plant / A. A. Alsarayreh et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 248. Article 119220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119220>.
- [65] Membrane modeling using CFD: Combined evaluation of mass transfer and geometrical influences in 1D and 3D / Haddadi B., Jordan C., Miltner M., Harsek M. *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 563. Pp. 199–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.040>.
- [66] Ahmad A. L., Lau K. K. Impact of different spacer filament geometries on 2D unsteady hydrodynamics and concentration polarization in spiral wound membrane channel. *Journal of Membrane Science*. 2006. Vol. 286, no. 1–2. Pp. 77–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.09.018>.
- [67] Koutsou C. P., Yiantsios S. G., Karabelas A. J. Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: Effect of spacer geometrical characteristics. *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 291, no. 1–2. Pp. 53–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.12.032>.
- [68] Ruiz-García A., de la Nuez Pestana I. Feed spacer geometries and permeability coefficients: Effect on the performance in BWRO spiral-wound membrane modules. *Water*. 2019. Vol. 11, no. 1. Article 152. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11010152>.
- [69] Abdelbaky M. M. A., El-Refaee M. M. A. A 3D CFD comparative study between torsioned and non-torsioned net-type feed spacer in reverse osmosis.

- Applied Sciences*. 2019. Vol. 1, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1098-8>.
- [70] 3D CFD study on hydrodynamics and mass transfer phenomena for SWM feed spacer with different floating characteristics / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fimbres Weihs G. A. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 159. Pp. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.010>.
- [71] Saliakellis P., Koutsou C., Karabelas A. The effect of gap reduction on fluid dynamics and mass transfer in membrane narrow channels filled with novel spacers – A detailed computational study. *Membranes*. 2022. Vol. 13, no. 1. Article 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13010020>.
- [72] Dynamic evolution of membrane biofouling in feed channels affected by spacer–membrane clearance and the induced hydrodynamic conditions / W. Lin et al. *Journal of Membrane Science*. 2023. Vol. 668. Article 121209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121209>.
- [73] Saeed A., Vuthaluru R., Vuthaluru H. B. Investigations into the effects of mass transport and flow dynamics of spacer-filled membrane modules using CFD. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 93. Pp. 79–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.002>.
- [74] Spacer geometry and particle deposition in spiral wound membrane feed channels / A. I. Radu et al. *Water Research*. 2014. Vol. 64. Pp. 160–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.040>.
- [75] Determining effects of spacer orientations on channel hydraulic conditions using PIV / Haidari A. H., Heijman S. G. J., Uijtewaal W. S. J., van der Meer W. G. J. *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 31. Article 100820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100820>.
- [76] A rotary spacer system for energy-efficient membrane fouling control in oil/water emulsion filtration / N. I. Mat Nawi et al. *Membranes*. 2022. Vol. 12, no. 6. Article 554. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12060554>.
- [77] Review on strategies for biofouling mitigation in spiral wound membrane systems / S. S. Bucs et al. *Desalination*. 2018. Vol. 434. Pp. 189–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.023>.
- [78] Impacts of flow channel geometry, hydrodynamic and membrane properties on osmotic backwash of RO membranes – CFD modeling and simulation / Jeong K., Park M., Oh S., Kim J. H. *Desalination*. 2020. Vol. 476. Article 114229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114229>.
- [79] Structural tailoring of sharkskin-mimetic patterned reverse osmosis membranes for optimizing biofouling resistance / W. Choi et al. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 595. Article 117602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117602>.
- [80] Uppu A., Chaudhuri A., Prasad Das S. Numerical modeling of particulate fouling and cake-enhanced concentration polarization in roto-dynamic reverse osmosis filtration systems. *Desalination*. 2019. Vol. 468. Article 114053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.019>.
- [81] Fimbres Weihs G. A., Wiley D. E. CFD analysis of tracer response technique under cake-enhanced osmotic pressure. *Journal of Membrane Science*. 2014. Vol. 449. Pp. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.08.015>.
- [82] Modeling the effect of biofilm formation on reverse osmosis performance: Flux, feed channel pressure drop and solute passage / Radu A. I., et al. *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 365, no. 1–2. Pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.036>.
- [83] Biofouling in spiral wound membrane systems: Three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data / Radu A. I., Vrouwenvelder J. S., van Loosdrecht M. C. M., Picioreanu C. *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 346, no. 1. Pp. 71–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.09.025>.
- [84] Effect of flow velocity, substrate concentration and hydraulic cleaning on biofouling of reverse osmosis feed channels / Radu A. I., Vrouwenvelder J. S., van Loosdrecht M. C. M., Picioreanu C. *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 188. Pp. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.133>.
- [85] Spatially-resolved in-situ quantification of biofouling using optical coherence tomography (OCT) and 3D image analysis in a spacer filled channel / L. Fortunato et al. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 524. Pp. 673–681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.052>.
- [86] Fortunato L., Leiknes T. In-situ biofouling assessment in spacer filled channels using optical coherence tomography (OCT): 3D biofilm thickness mapping. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 229. Pp. 231–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.021>.
- [87] Tang C. Y., Chong T. H., Fane A. G. Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 164, no. 1–2. Pp. 126–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.007>.
- [88] Combined biofouling and scaling in membrane feed channels: a new modeling approach / Radu A. I., Bergwerff L., van Loosdrecht M. C. M., Picioreanu C. *Biofouling*. 2015. Vol. 31, no. 1. Pp. 83–100. DOI: <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.996750>.
- [89] The critical role of feed spacer channel porosity in membrane biofouling: Insights and implications / W. Lin et al. *Journal of Membrane Science*. 2022. Vol. 649. Article 120395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120395>.
- [90] Advancement in membrane spacer technology: emerging trend and modification of three-dimensional printed membrane spacers for fouling mitigation / N. M. Munir et al. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2025. Vol. 19, no. 11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11705-025-2606-6>.

- [91] Improved quantitative evaluation of the fouling potential in spacer-filled membrane filtration channels through a biofouling index based on the relative pressure drop / Huisman K. T., Franco-Clavijo N., Vrouwenvelder J. S., Blankert B. *Journal of Membrane Science*. 2023. Vol. 671. Article 121400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121400>.
- [92] Kang G.-d., Cao Y.-m. Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review. *Water Research*. 2012. Vol. 46, no. 3. Pp. 584–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.041>.
- [93] Effects of hydrophilicity/hydrophobicity of membrane on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor / M. Zhang et al. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 175. Pp. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.058>.
- [94] Saeed A., Vuthaluru R., Vuthaluru H. B. Impact of feed spacer filament spacing on mass transport and fouling propensities of RO membrane surfaces. *Chemical Engineering Communications*. 2014. Vol. 202, no. 5. Pp. 634–646. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986445.2013.860525>.
- [95] Designing surfaces that kill bacteria on contact / Tiller J. C., Liao C.-J., Lewis K., Klivanov A. M. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2001. Vol. 98, no. 11. Pp. 5981–5985. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.111143098>.
- [96] Effect of vibration on fouling propensity of hollow fiber membranes in microfiltration and membrane distillation / Y. Park et al. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 192. Pp. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25151>.
- [97] Impact of permeate flux and gas sparging rate on membrane performance and process economics of granular anaerobic membrane bioreactors / S. Vinardell et al. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 825. Article 153907. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153907>.
- [98] Simulated preparation and hydration property of a new-generation zwitterionic modified PVDF membrane / H. Zhu et al. *Journal of Membrane Science*. 2022. Vol. 652. Article 120498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120498>.
- [99] Assessment of anti-bacterial adhesion and anti-biofouling potential of plasma-mediated poly(sulfobetaine methacrylate) coatings of feed spacer / Jabłońska M., Menzel M., Hirsch U., Heilmann A. *Desalination*. 2020. Vol. 493. Article 114664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114664>.
- [100] Modification of a polypropylene feed spacer with metal oxide-thin film by chemical bath deposition for biofouling control in membrane filtration / C. Thamaraiselvan et al. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 573. Pp. 511–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.033>.
- [101] Experimental characterization and numerical simulation of the anti-biofouling activity of nanosilver-modified feed spacers in membrane filtration / Ronen A., Lerman S., Ramon G. Z., Dosoretz C. G. *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 475. Pp. 320–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.10.042>.
- [102] Mi B. Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving. *Science*. 2014. Vol. 343, no. 6172. Pp. 740–742. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1250247>.
- [103] An integrated rotating biological contactor and membrane separation process for domestic wastewater treatment / S. Waqas et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2020. Vol. 59, no. 6. Pp. 4257–4265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.029>.
- [104] Enhancing fouling mitigation of submerged flat-sheet membranes by vibrating 3D-spacers / Y. Z. Tan et al. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 215. Pp. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.085>.
- [105] Performance evaluation of a novel reciprocation membrane bioreactor (rMBR) for enhanced nutrient removal in wastewater treatment: a comparative study / Ho J., Smith S., Kim G. D., Roh H. K. *Water Science and Technology*. 2015. Vol. 72, no. 6. Pp. 917–927. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.267>.
- [106] Spacer vibration for fouling control of submerged flat sheet membranes / B. Wu et al. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 210. Pp. 719–728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.062>.

RECENT ADVANCES IN THE INVESTIGATION OF MEMBRANE CHANNEL HYDRODYNAMICS: A CRITICAL REVIEW

Yasenchuk V.V.

postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1012-9475>, e-mail: Ivitaliy10@ukr.net;

Hulienko S.V.

PhD (Engineering), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9042-870X>, e-mail: sergiigulienko@gmail.com

The abstract is a concise yet informative summary of the main aspects of a scientific work. It outlines the general scientific or practical context of the study, justifies its relevance and importance, and states the purpose of the work along with the tasks addressed. In this review, the results of scientific studies from 2015 to 2025 are systematized, focusing on the influence of spacer geometric parameters on the operational performance of spiral-wound reverse osmosis membrane modules. Contemporary approaches to spacer design optimization are analyzed, including the use of additive manufacturing (3D printing), computational fluid dynamics (CFD) methods, and experimental techniques for investigating hydrodynamics, mass transfer, and biofouling. The effects of filament diameter, mesh orientation angle, channel height, node shape, and spatial configuration (including TPMS – triply periodic minimal surfaces) on velocity distribution, shear stresses, and pressure drop are examined. The importance of finding a balance between enhanced mass transfer and minimized hydraulic losses is emphasized. Special attention is given to modeling biofouling processes, which represent the dominant type of membrane contamination and are closely linked to local hydrodynamic conditions in the channel, particularly the presence of stagnant zones. CFD studies with both permeable and impermeable boundary conditions are summarized, along with approaches for validating numerical models using high-resolution experimental methods such as OCT (Optical Coherence Tomography) and PIV (Particle Image Velocimetry). The review highlights the potential of 3D-printed and functionalized spacers (e.g., antibacterial coatings, hydrophilic materials) to reduce fouling intensity and improve the energy efficiency of membrane systems. Active fouling control methods, such as vibration and spacer rotation, which induce secondary flows, are also discussed. Key directions for future research are identified, including multiscale modeling, comprehensive descriptions of interactions between different fouling types, geometry optimization considering energy constraints, as well as the development of new materials and active biofouling control methods. The synthesized findings provide a scientific basis for the development of energy-efficient, fouling-resistant next-generation membrane technologies.

Keywords: membrane; biofouling; spacer; 3D printing; CFD modelling; reverse osmosis; concentration polarization.

References

- [1] F. Z. Najdawi and K. T. Neptune, "Optimizing reverse osmosis membrane parameters through the use of the solution-diffusion model: A review," *Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 9–32, 2022. doi: [10.4236/eng.2022.141002](#).
- [2] J. Luo, M. Li, E. M. V. Hoek, and Y. Heng, "Supercomputing and machine learning-aided optimal design of high permeability seawater reverse osmosis membrane systems," *Science Bulletin*, Vol. 68, iss. 4, 2023. doi: [10.1016/j.scib.2023.01.039](#).
- [3] C. Bhattacharjee, V. K. Saxena, and S. Dutta, "Fruit juice processing using membrane technology: A review," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 43, pp. 136–153, 2017. doi: [10.1016/j.ifset.2017.08.002](#).
- [4] R. Sarbatly, J. Sariau, and D. Krishnaiah, "Recent developments of membrane technology in the clarification and concentration of fruit juices," *Food Engineering Reviews*, vol. 15, pp. 420–437, 2023. doi: [10.1007/s12393-023-09346-2](#).
- [5] K. Foo, Y. Y. Liang, and G. A. F. Weihs, "CFD study of the effect of SWM feed spacer geometry on mass transfer enhancement driven by forced transient slip velocity," *Journal of Membrane Science*, vol. 597, article 117643, 2020. doi: [10.1016/j.memsci.2019.117643](#).
- [6] Y. Y. Liang, K. Y. Toh, and G. A. F. Weihs, "3D CFD study of the effect of multi-layer spacers on membrane performance under steady flow," *Journal of Membrane Science*, vol. 580, pp. 256–267, 2019. doi: [10.1016/j.memsci.2019.02.015](#).
- [7] S. B. Khan, S. Irfan, S. S. Lam, X. Sun, and S. Chen, "3D printed nanofiltration membrane technology for wastewater distillation," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, article 102958, 2022. doi: [10.1016/j.jwpe.2022.102958](#).
- [8] C. Park, and J.-O. Kim, "Performance of biofouling mitigating feed spacer by surface modification using quorum sensing inhibitor," *Desalination*, vol. 538, article 115904, 2022. doi: [10.1016/j.desal.2022.115904](#).
- [9] S. Atkinson, "Spacer patterns are printed directly onto membranes," *Membrane Technology*, vol. 2021, no. 11, article 7, 2021. doi: [10.1016/S0958-2118\(21\)00174-9](#).
- [10] S. V. Hulienko, V. V. Yashenchuk, and M. O. Protsiuk, "Refined assessment of the impact of membrane module channel curvature on pressure drop," *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 55–72, 2025. doi: [10.11113/jamst.v29n1.310](#).
- [11] X. Hu, J. Li, S. Yu, Z. Zhu, P. Lin, and X. Li, "Enhanced mass transfer and energy efficiency by a biomimetic feed spacer in reverse osmosis membrane modules," *Journal of Membrane Science*, vol. 713, article 123290, 2024. doi: [10.1016/j.memsci.2024.123290](#).
- [12] S. Yang et al., "Synergistically controlling biofouling and improving membrane module permeability by using simultaneously structurally optimized and surface modified feed spacers," *Journal of Membrane Science*, vol. 708, article 123046, 2024. doi: [10.1016/j.memsci.2024.123046](#).
- [13] O. Kaviani-pour, G. D. Ingram, and H. B. Vuthaluru, "Studies into the mass transfer and energy consumption of commercial feed spacers for RO membrane modules using CFD: Effectiveness of performance measures," *Chemical Engineering Research and*

- Design*, vol. 141, pp. 328–338, 2019. doi: **10.1016/j.cherd.2018.10.041**.
- [14] S. Kerdi, A. Qamar, J. S. Vrouwenvelder, and N. Ghaffour, “Fouling resilient perforated feed spacers for membrane filtration,” *Water Research*, vol. 140, pp. 211–219, 2018. doi: **10.1016/j.watres.2018.04.049**.
- [15] B. Gu, C. S. Adjiman, and X. Y. Xu, “The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations,” *Journal of Membrane Science*, vol. 527, pp. 78–91, 2017. doi: **10.1016/j.memsci.2016.12.058**.
- [16] S. M. Ali et al., “Energy efficient 3D printed column type feed spacer for membrane filtration,” *Water Research*, vol. 164, article 114961, 2019. doi: **10.1016/j.watres.2019.114961**.
- [17] C. P. Koutsou, and A. J. Karabelas, “A novel retentate spacer geometry for improved spiral wound membrane (SWM) module performance,” *Journal of Membrane Science*, vol. 488, pp. 129–142, 2015. doi: **10.1016/j.memsci.2015.03.064**.
- [18] L. D. Tijing, J. R. C. Dizon, I. Ibrahim, A. R. N. Nisay, H. K. Shon, and R. C. Advincula, “3D printing for membrane separation, desalination and water treatment,” *Applied Materials Today*, vol. 18, article 100486, 2020. doi: **10.1016/j.apmt.2019.100486**.
- [19] S. R. Barman, P. Gavit, S. Chowdhury, K. Chatterjee, and A. Nain, “3D-printed materials for wastewater treatment,” *JACS Au*, vol. 3, iss. 11, pp. 2930–2947, 2023. doi: **10.1021/jacsau.3c00409**.
- [20] Y. Ibrahim, and N. Hilal, “The potentials of 3D-printed feed spacers in reducing the environmental footprint of membrane separation processes,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, article 109249, 2022. doi: **10.1016/j.jece.2022.109249**.
- [21] S. H. Yousefi, and H. Vahedi Tafreshi, “Modeling electrospun fibrous structures with embedded spacer particles: Application to aerosol filtration,” *Separation and Purification Technology*, vol. 235, article 116184, 2020. doi: **10.1016/j.seppur.2019.116184**.
- [22] N. Yanar, M. Son, H. Park, and H. Choi, “Bio-mimetically inspired 3D-printed honeycombed support (spacer) for the reduction of reverse solute flux and fouling of osmotic energy driven membranes,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 83, pp. 343–350, 2020. doi: **10.1016/j.jiec.2019.12.007**.
- [23] J.-Y. Lee et al., “The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology,” *Journal of Membrane Science*, vol. 499, pp. 480–490, 2016. doi: **10.1016/j.memsci.2015.11.008**.
- [24] N. Sreedhar et al., “3D printed feed spacers based on triply periodic minimal surfaces for flux enhancement and biofouling mitigation in RO and UF,” *Desalination*, vol. 425, pp. 12–21, 2018. doi: **10.1016/j.desal.2017.10.010**.
- [25] N. Thomas, N. Sreedhar, O. Al-Ketan, R. Rowshan, R. K. Abu Al-Rub, and H. Arafat, “3D printed spacers based on TPMS architectures for scaling control in membrane distillation,” *Journal of Membrane Science*, vol. 581, pp. 38–49, 2019. doi: **10.1016/j.memsci.2019.03.039**.
- [26] N. Sreedhar et al., “Mass transfer analysis of ultrafiltration using spacers based on triply periodic minimal surfaces: Effects of spacer design, directionality and voidage,” *Journal of Membrane Science*, vol. 561, pp. 89–98, 2018. doi: **10.1016/j.memsci.2018.05.028**.
- [27] N. Thomas, N. Sreedhar, O. Al-Ketan, R. Rowshan, R. K. Abu Al-Rub, and H. Arafat, “3D printed triply periodic minimal surfaces as spacers for enhanced heat and mass transfer in membrane distillation,” *Desalination*, vol. 443, pp. 256–271, 2018. doi: **10.1016/j.desal.2018.06.009**.
- [28] E. H. C. Castillo et al., “3D printed spacers for organic fouling mitigation in membrane distillation,” *Journal of Membrane Science*, vol. 581, pp. 331–343, 2019. doi: **10.1016/j.memsci.2019.03.040**.
- [29] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and D. F. Fletcher, “CFD study of the effect of perforated spacer on pressure loss and mass transfer in spacer-filled membrane channels,” *Chemical Engineering Science*, vol. 222, article 115704, 2020. doi: **10.1016/j.ces.2020.115704**.
- [30] I. E. Mokhtar et al., “CFD prediction of flow, heat and mass transfer in woven spacer-filled channels for membrane processes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 173, article 121246, 2021. doi: **10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246**.
- [31] I. E. Mokhtar et al., “CFD prediction of flow, heat and mass transfer in woven spacer-filled channels for membrane processes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 173, article 121246, 2021. doi: **10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246**.
- [32] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, and D. E. Wiley, “Comparison of oscillating flow and slip velocity mass transfer enhancement in spacer-filled membrane channels: CFD analysis and validation,” *Journal of Membrane Science*, vol. 593, article 117433, 2020. doi: **10.1016/j.memsci.2019.117433**.
- [33] V. Geraldies et al., “Designing centrifugal membrane filters with uniform pressure for UF/NF/RO separations,” *Journal of Membrane Science*, 2024, article 122752. doi: **10.1016/j.memsci.2024.122752**.
- [34] C. P. Koutsou, A. J. Karabelas, and M. Kostoglou, “Membrane desalination under constant water recovery – The effect of module design parameters on system performance,” *Separation and Purification Technology*, vol. 147, pp. 90–113, 2015. doi: **10.1016/j.seppur.2015.04.012**.
- [35] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and G. A. Fimbres Weihs, “A review of CFD modelling and performance metrics for osmotic membrane processes,” *Membranes*, vol. 10, no. 10, article 285, 2020. doi: **10.3390/membranes10100285**.
- [36] C. Kürzl, M. Hartinger, P. Ong, R. Schopf, S. Schiffer, and U. Kulozik, “Increasing performance of spiral-wound modules by improving stability against axial pressure drop and utilising pulsed flow,” *Membranes*,

- vol. 13, no. 9, article 791, 2023. doi: **10.3390/membranes13090791**.
- [37] Z. Han, M. Terashima, B. Liu, and H. Yasui, "CFD investigation of the effect of the feed spacer on hydrodynamics in spiral wound membrane modules," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 23, no. 4, article 80, 2018. doi: **10.3390/mca23040080**.
- [38] O. Kaviani-pour, G. D. Ingram, and H. B. Vuthaluru, "Investigation into the effectiveness of feed spacer configurations for reverse osmosis membrane modules using computational fluid dynamics," *Journal of Membrane Science*, vol. 526, pp. 156–171, 2017. doi: **10.1016/j.memsci.2016.12.034**.
- [39] S. Schiffer, and U. Kulozik, "Effect of temperature-dependent bacterial growth during milk protein fractionation by means of 0.1 μm microfiltration on the length of possible production cycle times," *Membranes*, vol. 10, no. 11, article 326, 2020. doi: **10.3390/membranes10110326**.
- [40] J. Chamberland et al., "Influence of feed temperature on biofouling of ultrafiltration membrane during skim milk processing," *International Dairy Journal*, vol. 93, pp. 99–105, 2019. doi: **10.1016/j.idairyj.2019.02.005**.
- [41] C. Carrascosa, D. Raheem, F. Ramos, A. Saraiva, and A. Raposo, "Microbial biofilms in the food industry – A comprehensive review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 4, article 2014, 2021. doi: **10.3390/ijerph18042014**.
- [42] T. Y. Qiu, and P. A. Davies, "Concentration polarization model of spiral-wound membrane modules with application to batch-mode RO desalination of brackish water," *Desalination*, vol. 368, pp. 36–47, 2015. doi: **10.1016/j.desal.2014.12.048**.
- [43] N. M. Farhat, M. Staal, Sz. S. Bucs, M. C. M. van Loosdrecht, and J. S. Vrouwenvelder, "Spatial heterogeneity of biofouling under different cross-flow velocities in reverse osmosis membrane systems," *Journal of Membrane Science*, vol. 520, pp. 964–971, 2016. doi: **10.1016/j.memsci.2016.08.065**.
- [44] M. Hartinger, S. Schiffer, H.-J. Heidebrecht, J. Dümpler, and U. Kulozik, "Milk protein fractionation by custom-made prototypes of spiral-wound microfiltration membranes operated at extreme crossflow velocities," *Journal of Membrane Science*, vol. 605, article 118110, 2020. doi: **10.1016/j.memsci.2020.118110**.
- [45] H. S. Abid, D. J. Johnson, R. Hashaikh, and N. Hilal, "A review of efforts to reduce membrane fouling by control of feed spacer characteristics," *Desalination*, vol. 420, pp. 384–402, 2017. doi: **10.1016/j.desal.2017.07.019**.
- [46] Sz. S. Bucs, A. I. Radu, V. Lavric, J. S. Vrouwenvelder, and C. Picioreanu, "Effect of different commercial feed spacers on biofouling of reverse osmosis membrane systems: A numerical study," *Desalination*, vol. 343, pp. 26–37, 2014. doi: **10.1016/j.desal.2013.11.007**.
- [47] M. Amokrane, D. Sadaoui, C. P. Koutsou, A. J. Karabelas, and M. Dudeck, "A study of flow field and concentration polarization evolution in membrane channels with two-dimensional spacers during water desalination," *Journal of Membrane Science*, vol. 477, pp. 139–150, 2015. doi: **10.1016/j.memsci.2014.11.029**.
- [48] C. P. Koutsou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, "A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number," *Journal of Membrane Science*, vol. 326, no. 1, pp. 234–251, 2009. doi: **10.1016/j.memsci.2008.10.007**.
- [49] C. Completo, V. Semiao, and V. Geraldes, "Efficient CFD-based method for designing cross-flow nanofiltration small devices," *Journal of Membrane Science*, vol. 500, pp. 190–202, 2016. doi: **10.1016/j.memsci.2015.11.012**.
- [50] G. A. Fimbres-Weihs, and D. E. Wiley, "Numerical study of mass transfer in three-dimensional spacer-filled narrow channels with steady flow," *Journal of Membrane Science*, vol. 306, no. 1–2, pp. 228–243, 2007. doi: **10.1016/j.memsci.2007.08.043**.
- [51] M. Shakaib, S. M. F. Hasani, and M. Mahmood, "CFD modeling for flow and mass transfer in spacer-obstructed membrane feed channels," *Journal of Membrane Science*, vol. 326, no. 2, pp. 270–284, 2009. doi: **10.1016/j.memsci.2008.09.052**.
- [52] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and G. A. Fimbres Weihs, "The techno-economic case for coupling advanced spacers to high-permeance RO membranes for desalination," *Desalination*, vol. 491, article 114534, 2020. doi: **10.1016/j.desal.2020.114534**.
- [53] V. Geraldes, and M. D. Afonso, "Generalized mass-transfer correction factor for nanofiltration and reverse osmosis," *AIChE Journal*, vol. 52, no. 10, pp. 3353–3362, 2006. doi: **10.1002/aic.10968**.
- [54] Q. Yang et al., "Multiscale analysis of permeable and impermeable wall models for seawater reverse osmosis desalination," *Separations*, vol. 10, no. 2, article 134, 2023. doi: **10.3390/separations10020134**.
- [55] W. Wei, X. Zou, X. Ji, R. Zhou, K. Zhao, and Y. Wang, "Analysis of concentration polarisation in full-size spiral wound reverse osmosis membranes using computational fluid dynamics," *Membranes*, vol. 11, no. 5, article 353, 2021. doi: **10.3390/membranes11050353**.
- [56] J. Schwing, P. R. Neal, D. E. Wiley, and A. G. Fane, "Estimation of foulant deposition across the leaf of a spiral-wound module," *Desalination*, vol. 146, no. 1–3, pp. 203–208, 2002. doi: **10.1016/S0011-9164(02)00471-X**.
- [57] J. Schwing, D. E. Wiley, and D. F. Fletcher, "A CFD study of unsteady flow in narrow spacer-filled channels for spiral-wound membrane modules,"

- Desalination*, vol. 146, no. 1–3, pp. 195–201, 2002. doi: **10.1016/S0011-9164(02)00470-8**.
- [58] J. Schwinge, D. E. Wiley, and D. F. Fletcher, “Simulation of unsteady flow and vortex shedding for narrow spacer-filled channels,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 20, pp. 4962–4977, 2003. doi: **10.1021/ie030211n**.
- [59] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, and D. F. Fletcher, “CFD study of the effect of unsteady slip velocity waveform on shear stress in membrane systems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 192, pp. 16–24, 2018. doi: **10.1016/j.ces.2018.07.009**.
- [60] Y. Y. Liang, G. Fimbres Weihs, R. Setiawan, and D. Wiley, “CFD modelling of unsteady electro-osmotic permeate flux enhancement in membrane systems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 146, pp. 189–198, 2016. doi: **10.1016/j.ces.2016.02.028**.
- [61] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, and D. E. Wiley, “CFD modelling of electro-osmotic permeate flux enhancement in spacer-filled membrane channels,” *Journal of Membrane Science*, vol. 507, pp. 107–118, 2016. doi: **10.1016/j.memsci.2016.02.012**.
- [62] X. Su, W. Li, A. Palazzolo, and S. Ahmed, “Concentration polarization and permeate flux variation in a vibration enhanced reverse osmosis membrane module,” *Desalination*, vol. 433, pp. 75–88, 2018. doi: **10.1016/j.desal.2018.01.001**.
- [63] X. Su, W. Li, A. Palazzolo, and S. Ahmed, “Permeate flux increase by colloidal fouling control in a vibration enhanced reverse osmosis membrane desalination system,” *Desalination*, vol. 453, pp. 22–36, 2019. doi: **10.1016/j.desal.2018.12.003**.
- [64] A. A. Alsarayreh, M. A. Al-Obaidi, A. M. Al-Hroub, R. Patel, and I. M. Mujtaba, “Evaluation and minimisation of energy consumption in a medium-scale reverse osmosis brackish water desalination plant,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 248, p. 119220, 2020. doi: **10.1016/j.jclepro.2019.119220**.
- [65] B. Haddadi, C. Jordan, M. Miltner, and M. Harasek, “Membrane modeling using CFD: Combined evaluation of mass transfer and geometrical influences in 1D and 3D,” *Journal of Membrane Science*, vol. 563, pp. 199–209, 2018. doi: **10.1016/j.memsci.2018.05.040**.
- [66] A. L. Ahmad, and K. K. Lau, “Impact of different spacer filament geometries on 2D unsteady hydrodynamics and concentration polarization in spiral wound membrane channel,” *Journal of Membrane Science*, vol. 286, no. 1–2, pp. 77–92, 2006. doi: **10.1016/j.memsci.2006.09.018**.
- [67] C. P. Koutsou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, “Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: Effect of spacer geometrical characteristics,” *Journal of Membrane Science*, vol. 291, no. 1–2, pp. 53–69, 2007. doi: **10.1016/j.memsci.2006.12.032**.
- [68] A. Ruiz-García, and I. de la Nuez Pestana, “Feed spacer geometries and permeability coefficients: Effect on the performance in BWRO spiral-wound membrane modules,” *Water*, vol. 11, no. 1, article 152, 2019. doi: **10.3390/w11010152**.
- [69] M. M. Abdelbaky, and M. M. El-Refae, “A 3D CFD comparative study between torsioned and non-torsioned net-type feed spacer in reverse osmosis,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 9, 2019. doi: **10.1007/s42452-019-1098-8**.
- [70] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and G. A. Fimbres Weihs, “3D CFD study on hydrodynamics and mass transfer phenomena for SWM feed spacer with different floating characteristics,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 159, pp. 36–46, 2020. doi: **10.1016/j.cherd.2020.04.010**.
- [71] P. Saliakellis, C. Koutsou, and A. Karabelas, “The effect of gap reduction on fluid dynamics and mass transfer in membrane narrow channels filled with novel spacers – A detailed computational study,” *Membranes*, vol. 13, no. 1, article 20, 2022. doi: **10.3390/membranes13010020**.
- [72] W. Lin, D. Li, Q. Wang, X.-m. Wang, and X. Huang, “Dynamic evolution of membrane biofouling in feed channels affected by spacer–membrane clearance and the induced hydrodynamic conditions,” *Journal of Membrane Science*, vol. 668, article 121209, 2023. doi: **10.1016/j.memsci.2022.121209**.
- [73] A. Saeed, R. Vuthaluru, and H. B. Vuthaluru, “Investigations into the effects of mass transport and flow dynamics of spacer filled membrane modules using CFD,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 93, pp. 79–99, 2015. doi: **10.1016/j.cherd.2014.07.002**.
- [74] A. I. Radu, M. S. H. van Steen, J. S. Vrouwenvelder, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, “Spacer geometry and particle deposition in spiral wound membrane feed channels,” *Water Research*, vol. 64, pp. 160–176, 2014. doi: **10.1016/j.watres.2014.06.040**.
- [75] A. H. Haidari, S. G. J. Heijman, W. S. J. Uijtewaald, and W. G. J. van der Meer, “Determining effects of spacer orientations on channel hydraulic conditions using PIV,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 31, article 100820, 2019. doi: **10.1016/j.jwpe.2019.100820**.
- [76] N. I. Mat Nawi et al., “A rotary spacer system for energy-efficient membrane fouling control in oil/water emulsion filtration,” *Membranes*, vol. 12, no. 6, article 554, 2022. doi: **10.3390/membranes12060554**.
- [77] Sz. S. Bucs, N. Farhat, J. C. Kruithof, C. Picioreanu, M. C. M. van Loosdrecht, and J. S. Vrouwenvelder, “Review on strategies for biofouling mitigation in spiral wound membrane systems,” *Desalination*, vol. 434, pp. 189–197, 2018. doi: **10.1016/j.desal.2018.01.023**.
- [78] K. Jeong, M. Park, S. Oh, and J. H. Kim, “Impacts of flow channel geometry, hydrodynamic and membrane properties on osmotic backwash of RO membranes – CFD modeling and simulation,” *Desalination*,

- vol. 476, article 114229, 2020. doi: **10.1016/j.desal.2019.114229**.
- [79] W. Choi et al., "Structural tailoring of sharkskin-mimetic patterned reverse osmosis membranes for optimizing biofouling resistance," *Journal of Membrane Science*, vol. 595, article 117602, 2020. doi: **10.1016/j.memsci.2019.117602**.
- [80] A. Uppu, A. Chaudhuri, and S. P. Das, "Numerical modeling of particulate fouling and cake-enhanced concentration polarization in rotodynamic reverse osmosis filtration systems," *Desalination*, vol. 468, article 114053, 2019. doi: **10.1016/j.desal.2019.06.019**.
- [81] G. A. Fimbres Weihs, and D. E. Wiley, "CFD analysis of tracer response technique under cake-enhanced osmotic pressure," *Journal of Membrane Science*, vol. 449, pp. 38–49, 2014. doi: **10.1016/j.memsci.2013.08.015**.
- [82] A. I. Radu, J. S. Vrouwenvelder, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, "Modeling the effect of biofilm formation on reverse osmosis performance: Flux, feed channel pressure drop and solute passage," *Journal of Membrane Science*, vol. 365, no. 1–2, pp. 1–15, 2010. doi: **10.1016/j.memsci.2010.07.036**.
- [83] J. S. Vrouwenvelder, C. Picioreanu, J. C. Kruithof, and M. C. M. van Loosdrecht, "Biofouling in spiral wound membrane systems: Three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data," *Journal of Membrane Science*, vol. 346, no. 1, pp. 71–85, 2010. doi: **10.1016/j.memsci.2009.09.025**.
- [84] A. I. Radu, J. S. Vrouwenvelder, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, "Effect of flow velocity, substrate concentration and hydraulic cleaning on biofouling of reverse osmosis feed channels," *Chemical Engineering Journal*, vol. 188, pp. 30–39, 2012. doi: **10.1016/j.cej.2012.01.133**.
- [85] L. Fortunato, Sz. Bucs, R. V. Linares, C. Cali, J. S. Vrouwenvelder, and T.-O. Leiknes, "Spatially-resolved in-situ quantification of biofouling using optical coherence tomography (OCT) and 3D image analysis in a spacer filled channel," *Journal of Membrane Science*, vol. 524, pp. 673–681, 2017. doi: **10.1016/j.memsci.2016.11.052**.
- [86] L. Fortunato, and T. Leiknes, "In-situ biofouling assessment in spacer filled channels using optical coherence tomography (OCT): 3D biofilm thickness mapping," *Bioresource Technology*, vol. 229, pp. 231–235, 2017. doi: **10.1016/j.biortech.2017.01.021**.
- [87] C. Y. Tang, T. H. Chong, and A. G. Fane, "Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 164, no. 1–2, pp. 126–143, 2011. doi: **10.1016/j.cis.2010.10.007**.
- [88] A. I. Radu, L. Bergwerff, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, "Combined biofouling and scaling in membrane feed channels: A new modeling approach," *Biofouling*, vol. 31, no. 1, pp. 83–100, 2015. doi: **10.1080/08927014.2014.996750**.
- [89] W. Lin et al., "The critical role of feed spacer channel porosity in membrane biofouling: Insights and implications," *Journal of Membrane Science*, vol. 649, article 120395, 2022. doi: **10.1016/j.memsci.2022.120395**.
- [90] N. M. Munir et al., "Advancement in membrane spacer technology: Emerging trend and modification of three-dimensional printed membrane spacers for fouling mitigation," *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 19, no. 11, 2025. doi: **10.1007/s11705-025-2606-6**.
- [91] K. T. Huisman, N. Franco-Clavijo, J. S. Vrouwenvelder, and B. Blankert, "Improved quantitative evaluation of the fouling potential in spacer-filled membrane filtration channels through a biofouling index based on the relative pressure drop," *Journal of Membrane Science*, vol. 671, article 121400, 2023. doi: **10.1016/j.memsci.2023.121400**.
- [92] G.-D. Kang, and Y.-M. Cao, "Development of anti-fouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review," *Water Research*, vol. 46, no. 3, pp. 584–600, 2012. doi: **10.1016/j.watres.2011.11.041**.
- [93] M. Zhang, B.-Q. Liao, X. Zhou, Y. He, H. Hong, H. Lin, and J. Chen, "Effects of hydrophilicity/hydrophobicity of membrane on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor," *Bioresource Technology*, vol. 175, pp. 59–67, 2015. doi: **10.1016/j.biortech.2014.10.058**.
- [94] A. Saeed, R. Vuthaluru, and H. B. Vuthaluru, "Impact of feed spacer filament spacing on mass transport and fouling propensities of RO membrane surfaces," *Chemical Engineering Communications*, vol. 202, no. 5, pp. 634–646, 2014. doi: **10.1080/00986445.2013.860525**.
- [95] J. C. Tiller, C.-J. Liao, K. Lewis, and A. M. Klivanov, "Designing surfaces that kill bacteria on contact," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, no. 11, pp. 5981–5985, 2001. doi: **10.1073/pnas.111143098**.
- [96] Y. Park, Y. Choi, J. Choi, J. Ju, B. Kim, and S. Lee, "Effect of vibration on fouling propensity of hollow fiber membranes in microfiltration and membrane distillation," *Desalination and Water Treatment*, vol. 192, pp. 11–18, 2020. doi: **10.5004/dwt.2020.25151**.
- [97] S. Vinardell et al., "Impact of permeate flux and gas sparging rate on membrane performance and process economics of granular anaerobic membrane bioreactors," *Science of the Total Environment*, vol. 825, article 153907, 2022. doi: **10.1016/j.scitotenv.2022.153907**.
- [98] H. Zhu, Z. Chen, L. Qin, L. Zhang, and J. Zhou, "Simulated preparation and hydration property of a new-generation zwitterionic modified PVDF membrane," *Journal of Membrane Science*, vol. 652, article 120498, 2022. doi: **10.1016/j.memsci.2022.120498**.
- [99] M. Jabłońska, M. Menzel, U. Hirsch, and A. Heilmann, "Assessment of anti-bacterial adhesion and anti-biofouling potential of plasma-mediated

- poly(sulfobetaine methacrylate) coatings of feed spacer,” *Desalination*, vol. 493, article 114664, 2020. doi: **10.1016/j.desal.2020.114664**.
- [100] C. Thamaraiselvan, Y. Carmiel, G. Eliad, C. N. Sukenik, R. Semiat, and C. G. Dosoretz, “Modification of a polypropylene feed spacer with metal oxide-thin film by chemical bath deposition for biofouling control in membrane filtration,” *Journal of Membrane Science*, vol. 573, pp. 511–519, 2019. doi: **10.1016/j.memsci.2018.12.033**.
- [101] A. Ronen, S. Lerman, G. Z. Ramon, and C. G. Dosoretz, “Experimental characterization and numerical simulation of the anti-biofouling activity of nanosilver-modified feed spacers in membrane filtration,” *Journal of Membrane Science*, vol. 475, pp. 320–329, 2015. doi: **10.1016/j.memsci.2014.10.042**.
- [102] B. Mi, “Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving,” *Science*, vol. 343, no. 6172, pp. 740–742, 2014. doi: **10.1126/science.1250247**.
- [103] S. Waqas, M. R. Bilad, Z. B. Man, C. Klaysom, J. Jaafar, and A. L. Khan, “An integrated rotating biological contactor and membrane separation process for domestic wastewater treatment,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 4257–4265, 2020. doi: **10.1016/j.aej.2020.07.029**.
- [104] Y. Z. Tan et al., “Enhancing fouling mitigation of submerged flat-sheet membranes by vibrating 3D-spacers,” *Separation and Purification Technology*, vol. 215, pp. 70–80, 2019. doi: **10.1016/j.seppur.2018.12.085**.
- [105] J. Ho, S. Smith, G. D. Kim, and H. K. Roh, “Performance evaluation of a novel reciprocation membrane bioreactor (rMBR) for enhanced nutrient removal in wastewater treatment: A comparative study,” *Water Science and Technology*, vol. 72, no. 6, pp. 917–927, 2015. doi: **10.2166/wst.2015.267**.
- [106] B. Wu et al., “Spacer vibration for fouling control of submerged flat sheet membranes,” *Separation and Purification Technology*, vol. 210, pp. 719–728, 2019. doi: **10.1016/j.seppur.2018.08.062**.
- Стаття надійшла 24.01.2026
Стаття прийнята 18.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Ясеньчук В. В., Гулієнко С. В. Новітні досягнення в дослідженні гідродинаміки мембранних каналів: критичний огляд. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 188–205. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359808>.

136 МЕТАЛУРГІЯ

UDC 669.18:004.94

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359809

**DEVELOPMENT OF THE SERVICE FOR CALCULATING
THE MATERIAL AND THERMAL BALANCE OF STEEL SMELTING**

Chuprynov Ye.V.	PhD (Engineering), associate professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua ;
Kassim D.A.	D.Sc. (Engineering), professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Hrybkov E.P.	D.Sc. (Engineering), professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1565-6294 , e-mail: eduard.gribkov@mipolytech.education ;
Malii Kh.V.	PhD (Engineering), associate professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education ;
Rekov Yu.V.	PhD (Engineering), associate professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0318-0168 , e-mail: yuriy.rekov@mipolytech.education

The literature review highlights innovative approaches to modeling: the use of kinetic equations, computational fluid dynamics (CFD) and machine learning algorithms (XGBoost, Random Forest) to predict carbon and oxygen content. Special attention is paid to adapting models to new environmental technologies, in particular the use of hydrogen and scrap metal processing, the share of which in the charge can reach 40%. The experience of world leaders (Danieli Corus, Kuttner) and domestic scientific schools (NMetAU) in creating decision support systems, such as the «Technologist-Operator Advisor», is separately considered. The own development of the Department of Metallurgical Technologies of DUET and «Metinvest Polytechnics» is presented – a universal service for calculating smelting balances. The software product is built on the basis of a modern technology stack (HTML, CSS, JavaScript) using the Node.js platform for the server part. This choice of tools provides cross-platform compatibility, easy integration with existing industrial systems, and the possibility of remote access, which is critically important for training engineers in conditions of pandemic restrictions. The service is implemented in two modes: «light» (for educational purposes) and "industrial" (with full consideration of all elements of the charge). The program allows you to quickly enter data on the composition of pig iron, scrap, ferroalloys and receive final balance tables with an error of no more than 0.1-0.5%. The authors provide examples of the program code and the system interface, demonstrating the mechanisms for checking the chemical composition of the charge and generating final reports.

Keywords: Basic Oxygen Furnace (BOF); material and heat balance; automation of metallurgy; web service; chemical composition prediction; digitalization of production; mathematical modeling; Node.js.

Statement of the problem

The modern BOF process is characterized by a high level of automation. The use of powerful computing systems allows steelmakers to significantly simplify a number of technological operations: carry out an accurate calculation of the shrinkable metal charge, slag-forming and additives in the smelting process, to predict the chemical composition of the metal on heaps and after deoxidation, and much more.

The steelmaking process is controlled by a distributor operator, whose main role until recently was reduced to the analysis of computer data, which are assembled by a system of sensors and measuring instruments and further technological decision, based on the received data. In recent years, the development of digital technologies has reached

a level at which the capabilities of modern software have become so extensive that they have allowed them to be introduced into the management processes of complex, multifactor technologies.

The development of an online system for calculating material and thermal balances is a critical task for modern basic oxygen furnace (BOF) steelmaking. Modern research focuses on integrating kinetic models, computational fluid dynamics (CFD), and data-driven approaches to enhance the accuracy of real-time process control.

**Analysis of the latest achievements
on the identified problem**

The core of any converter control system lies in the precision of its material and heat balance equations. Recent

studies emphasize the need to adapt these balances to new technologies, such as bottom-blown O_2 - CO_2 -CaO processes, where researchers have established high utilization ratios for injected materials (e.g., 91.35% for lime powder) [1]. Similarly, the transition to greener steelmaking through direct reduction plants (DRP) requires comprehensive mass conservation principles and enthalpy-based heat balance calculations to evaluate the impact of hydrogen injection [2]. The inclusion of specific technological factors, such as the presence of a slag "skull" on the lining, significantly alters the thermal regime and requires additional heat balance articles to account for the physical heat and slag-forming components introduced by the skull [3].

Scrap metal serves as a primary coolant to balance excess heat in the BOF. Advanced numerical models now consider scrap blending by simultaneously analyzing steel quality, production cost, and energy use [4]. Research indicates that the density and proportion of scrap (up to 40% of the charge) drastically change the dynamics of bath temperature and carbon oxidation [5]. To maintain a rational melting process, models must account for the changing reactive surface area of scrap as it melts, often using fourth-degree polynomials for better accuracy [5].

A significant challenge in online systems is the transient nature of carbon removal. Kinetic equations have been developed to describe carbon removal in real-time, even in small converters working with cupola furnaces [6]. Modern approaches integrate machine learning (e.g., XGBoost, Random Forest) with theoretical kinetic models to predict tapping carbon and oxygen levels, improving prediction accuracy by over 6% through cyclic iteration algorithms [7]. Furthermore, coupling CFD with thermodynamic databases allows for the investigation of high-temperature reactions at the bubble-melt interface, providing insights into saturation times and pressure effects [8].

The efficiency of mass exchange and slag formation is deeply tied to the blowing mode. The use of two-tier lances has been shown to improve the heat balance and accelerate slag formation by optimizing the afterburning of CO to CO_2 [9]. Hydrodynamic factors, such as the ratio of the reaction zone length to the bath depth, are used to characterize mixing intensity and its subsequent effect on desulfurization and dephosphorization [10]. Optimal control strategies, including Model Predictive Control (MPC), are employed to stabilize CO_2 levels and minimize production costs while adhering to the boundary conditions of the steelmaking process [11].

Physical properties of slag, particularly viscosity, govern the splashing process used for lining protection [12]. Modern 3D models using the Volume of Fluid (VOF) method allow for quantitative analysis of droplet behavior and liquid film formation [13]. These models help determine optimal oxygen lance heights and flow rates to balance slag splashing effectiveness with safety and cost [13]. Additionally, out-of-furnace refining technologies for pig iron are being evaluated through adapted balance models to determine their impact on specific lime consumption and liquid iron yield [14].

In recent years, significant progress has been observed in steelmaking processes in the implementation of automated control systems for the oxygen-converter process. Metallurgical technology is an area of extremely specific processes, where the relationships between different factors can appear themselves with different strengths in conditions, differing only in hundredths of different indicators. Nevertheless, the high level of development of science allowed researchers to get a complete understanding of the chemical processes taking place in the converter bath, and the use of modern computing power has opened the way for a comprehensive study of the relationships between thousands of factors affecting steelmaking technology.

In 2014, the conference «Modern technologies of steelmaking production» was held at the PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih». Representatives of the world's leading metallurgical companies spoke at the conference (Heraeus Electro-Nite, Danieli Corus, Siemens VAI Metals Technologies, Steel Work, Kuttner GmbH), largest metallurgical enterprises (Dneprovsky metallurgical plant, Energostal, PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih») and scientific institutions of Ukraine (Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine, Kriviy Rih Metallurgical Institute). It is noteworthy that almost all the speeches were devoted to increasing the degree of automation and computerization of production.

Thus, Danieli Corus employees presented a universal model of the oxygen-converter shop (fig. 1), which allows engineers and technicians to carry out long-term planning for the development of the workshop, simulate logistics, calculate the potential for expanding production capacity, lay out the sequence of technological operations and much more [15].

Danieli Corus and Kuttner [16, 17] presented new solutions in the field of technological process control, which make it possible to reduce the duration of steel smelting by measuring the temperature of the melt and its chemical composition. As a result, technologists hit into the range of specified characteristics and there is no need for additional corrective measures.

The Department of Steel Metallurgy of the National Metallurgical Academy of Ukraine has developed a comprehensive program for forecasting the results of converter smelting "Advisor to the Technologist-Operator" (fig. 2), which is based on modern theoretical concepts of the pattern of converter processes and practical data on the operation of converters [18].

The program allows you to set the main parameters of technology by predicting the results of melting, based on controlled, conditionally controlled and uncontrolled process parameters. Thus, the program works as an assistant for the technologist, allowing him to quickly calculate consumables, determine the economic efficiency of certain solutions, and most importantly, to carry out calculations exclusively «by chemistry», thanks to which the technologist gets rid of the need to coordinate various process

parameters, which are highly dependent on the conditions of a particular production.

calculations of the material and thermal balance of converter smelting.

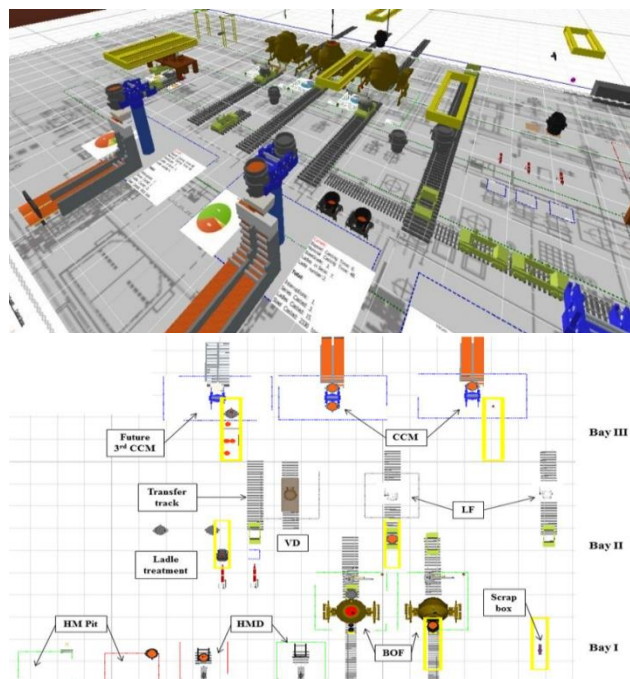


Fig. 1 – BOF model from Danieli Corus

Хімічний склад чугуна, температура чугуна і лома		Шихтовка плавки	
Содержание углерода, %	4,30	Садка конвертера, т	66,00
Содержание кремния, %	0,60	Расход чугуна, т	54,000
Содержание марганца, %	0,50	Расход металлолома, т	12,000
Содержание фосфора, %	0,065	Расход кремнистого лома, т	0,000
Содержание серы, %	0,030	Расход скрапа, т	0,000
Температура чугуна, °C	1300	Расход твердого чугуна, т	0,000
Температура лома, °C	20	Расход ЖСБ, т	0,000
		Расход извести, т	3,700
		Расход магнезитового флюса, т	0,306
		Расход плавикового шлата, т	0,207
		Расход известняка, т	0,000
		Расход дополнительного материала, т	0,000
		Расход рудного материала, т	0,000
		Расход теплоносителя, т	0,000
		Расход кислорода, м³	3153



Fig. 2 – Application interface «Technologist-operator advisor»

It should be noted, that the presence in the shop not of one, but several information systems, which would "lead" the process in parallel is not a disadvantage, but an advantage. This is due to the fact that each specific software is often based on different principles, and combining their results with recommendatory patterns for the technologist allows you to get a powerful synergistic effect, that has a positive effect on all production chains.

Nevertheless, the literary analysis and study of the proposals of the leading enterprises serving metallurgical plants, shows that at the moment there are not so many solutions on the software market, which would be based on

Purpose and task statement

The aim of the article is to substantiate and develop a service for automated calculation of material and heat balances of oxygen-converter smelting, which allows to increase the accuracy of predicting the chemical composition of the metal and optimize the consumption of charge materials. The presented work seeks to combine modern theoretical models of metallurgical processes with IT technologies (Node.js, JavaScript) to create a universal tool that provides remote access to calculations for both operational management of real production and for training qualified engineering personnel.

Summary of the main material

Material and heat balance of smelting is one of the most effective mechanisms for controlling the steel smelting process. With its help, technologists can make high-precision calculations of the entire converter process, from the blending to the predicted chemical composition of the steel after deoxidation.

In this regard, at the Department of Metallurgical Technologies of State University of Economics and Metallurgy Polytechnic work has begun on the creation of a service for calculating the material and heat balance, which can be easily connected to any software or hardware products from the outside.

The use of the web interface (fig. 3) was due to two reasons: 1) the developed program must have open opportunities for interaction with industrial enterprises, which is extremely easy to achieve precisely in the format of a web service; 2) the developed product is planned to be used in the process of training process engineers in the field of metallurgical technologies, and in the context of the pandemic situation that has formed in the world in 2020, the creation of training services that can be accessed remotely from anywhere in the world is an extremely urgent task.

Матеріальний баланс		ПРОФІЛЬ	ВІЙТИ
☁	Початкові дані		
📍	Визначення вмісту домішок в металевій частині шихти		
🔧	Матеріали з неметалевої шихти, що беруть участь в плавці		
📊	Визначення кількості шлаку і встановлення шлакового режиму		
🔄	Визначення максимально можливої кількості металевого брутку		
🔥	Фактичні витрати брутку з урахуванням додаткового охолоджувача		
🔥	Необхідні витрати вапна		
📊	Матеріальний баланс плавки		
🔥	Тепловий баланс плавки		
🔧	Кінцевий склад металу		

Fig. 3 – Service interface «Material and thermal balance of converter smelting»

When creating the program, the basic principles of web development were used, that is HTML (HyperText Markup Language – «hypertext markup language»), CSS (Cascading Style Sheets – cascading style sheets), JavaScript – multiparadigm programming language. As known, any client part (frontend) developed with language JavaScript. The main architectural features of the language: dynamic typing, weak typing, automatic memory management, prototype programming, functions as first class objects. Java Script is an object-oriented programming language, but it uses prototyping in the language. In addition, JavaScript has several advantages: functions as first-class objects, objects as lists, anonymous functions, closures, auto-casting, auto-garbage collection, and so on, which gives the language additional flexibility.

The application also uses an authorization system and a database, which makes it possible to store the data of an individual client. For the server side, the Node.js software platform is used.

Node.js adds the ability for JavaScript to interact with Input/Output devices through its API (written in C++), connect other external libraries written in different languages, providing calls to them from JavaScript-code. Node.js is used primarily on the server, serving as a web server.

A summary check of the chemical composition of elements is presented as an example code (fig. 4).

```
// liquidIron values
let iron_form = document.getElementById('ironResultForm'),
    ironResult = document.getElementById('iron_result')
carbon_value = iron_form.elements.liquidCarbon.value,
silicon_value = iron_form.elements.liquidSilicon.value,
manganese_value = iron_form.elements.liquidManganese.value,
sulfur_value = iron_form.elements.liquidSulfur.value,
phosphorus_value = iron_form.elements.liquidPhosphorus.value,
iron_value = iron_form.elements.liquidIron.value;
// trash values
let trash_form = document.getElementById('trashResultForm'),
    trashResult = document.getElementById('trash_result')
carbon_value = trash_form.elements.trashCarbon.value,
silicon_value = trash_form.elements.trashSilicon.value,
manganese_value = trash_form.elements.trashManganese.value,
sulfur_value = trash_form.elements.trashSulfur.value,
phosphorus_value = trash_form.elements.trashPhosphorus.value,
iron_value = trash_form.elements.trashIron.value;
// FeSi 65% values
let ferrum_form = document.getElementById('ferrumSiResultForm'),
    ferrumResult = document.getElementById('ferrum_result')
ferrum_value = ferrum_form.elements.ferrumSiliCarbon.value,
ferrum_value = ferrum_form.elements.ferrumSiliSilicon.value,
ferrum_value = ferrum_form.elements.ferrumSiliManganese.value,
ferrum_value = ferrum_form.elements.ferrumSiliSulfur.value,
ferrum_value = ferrum_form.elements.ferrumSiliPhosphorus.value,
ferrum = ferrum_form.elements.ferrumSiliIron.value;
// FeSiMn values
let ferrumSiMn_form = document.getElementById('ferrumSiMnResultForm'),
    ferrumSiMnResult = document.getElementById('ferrumSiMn_result')
ferrumSiMn_value = ferrumSiMn_form.elements.ferrumSiMnCarbon.value,
ferrumSiMn_value = ferrumSiMn_form.elements.ferrumSiMnSilicon.value,
ferrumSiMn_value = ferrumSiMn_form.elements.ferrumSiMnManganese.value,
```

```
ferrumSiMn_value = ferrumSiMn_form.elements.ferrumSiMnSulfur.value,
ferrumSiMn_value = ferrumSiMn_form.elements.ferrumSiMnPhosphorus.value,
ferrumSiMn = ferrumSiMn_form.elements.ferrumSiMnIron.value;
// function that returns the result of changes in the table
let ElementsChanged = (selector, resultContainer) => {
    const fields = document.querySelectorAll(selector)
    const values = {}
    let sum = 0
    fields.forEach(field => {
        const {name, value} = field
        values[name] = value
        sum += +value
    })
    resultContainer.innerHTML = sum.toFixed(2)
}
// select all selectors will change
let iron_form_inputs = document.querySelectorAll('.iron-form-inputs') // liquid iron
let trash_form_inputs = document.querySelectorAll('.trash-form-inputs') // trash
let ferrum_form_inputs = document.querySelectorAll('.ferrumSi-form-inputs') // FeSi 65%
let ferrumSiMn_form_inputs = document.querySelectorAll('.ferrumSiMn-form-inputs') // FeSiMn
// cycles for take inputs values
// ----- start -----
for (let i = 0; i < iron_form_inputs.length; i++) {
    iron_form_inputs[i].addEventListener("keyup", () => {ElementsChanged('.iron-form-inputs', ironResult)})
}
for (let i = 0; i < trash_form_inputs.length; i++) {
    trash_form_inputs[i].addEventListener("keyup", () => {ElementsChanged('.trash-form-inputs', trashResult)})
}
for (let i = 0; i < ferrum_form_inputs.length; i++) {
    ferrum_form_inputs[i].addEventListener("keyup", () => {ElementsChanged('.ferrumSi-form-inputs', ferrumResult)})
}
for (let i = 0; i < ferrumSiMn_form_inputs.length; i++) {
    ferrumSiMn_form_inputs[i].addEventListener("keyup", () => {ElementsChanged('.ferrumSiMn-form-inputs', ferrumSiMnResult)})
}
// ----- end -----
// call functions in the start app
ElementsChanged('.iron-form-inputs', ironResult)
ElementsChanged('.trash-form-inputs', trashResult)
ElementsChanged('.ferrumSi-form-inputs', ferrumResult)
ElementsChanged('.ferrumSiMn-form-inputs', ferrumSiMnResult)
```

Таблиця 1 - Хімічний склад металевої шихти, %

Найменування	C	Si	Mn	S	P	Fe	Усього
Части рідини	3.6	0.950	0.7	0.045	0.100	94.605	100.00
Вугілля	0.2	0.160	0.420	0.030	0.040	99.150	100.00
FeSi 65%	0	0	0	0	0	0	0.00
FeSiMn	2.5	17	65	0.03	0.1	15.370	100.00
Готова сталь	0.17-0.22	1-1.5	1-1.5	0.035	0.04	-	-

Fig. 4 – Checking the chemical composition of the charge

It should be noted that the program operates in two modes: lightweight and industrial. The lightweight version is more focused on the learning process of students and allows you to calculate the material and heat balance for the main chemical elements, and the industrial one takes into account all the chemical elements that can be found in the charge materials of oxygen-converter smelting.

When you click on each individual menu item shown in Fig. 3, the accountable interface is opened, where the technologist either sets certain indicators, or sees the results of the calculations.

The main summary tables of the calculation are the tables of material (fig. 5) and heat (fig. 6) balances, as well as the final composition of the metal (fig. 7).

Таблиця 11 – Матеріальний баланс плавки

Задано	Кіль-сть, кг	Отримано	Кіль-сть, кг
Чавун	77.51	Метал	90.42
Брухт	22.49	Шлак	13.654
Вално	7.721	Витрати металу	2
Окислювачі	0.3	Корольки в шлаку	0.41
Планковий шлаг	0.25	Втрата з пилком	0.389
Футерівка	0.3	CO	5.35
Дуги	5.898	CO ₂	2.102
Разом	114.469	H ₂ O	0.081
		SO ₂	0.004
		N ₂	0.047
		Разом	114.457

Нев'язка, % 0.01

Fig. 5 – Material balance of smelting

Прихід	кДж	%	Витрати	кДж	%
Фізичне тепло чавуну	91392.595	49.038	Фізичне тепло чавуну	126118.8	49.038
Фізичне тепло мінерального шлаку	772.584	0.415	Фізичне тепло шлаку	27407.410	14.706
Хімічне тепло окислення домішок	66656.401	35.765	Фізичне тепло газів, що відходять	13198.493	7.082
Тепло окислення заліза	10397.821	5.579	Розкладання оксиду заліза	5528.946	2.967
Тепло шлакоутворення	8666.5	4.65	Випаровування вологи	428.148	0.23
Тепло допалювання CO	8485.128	4.553	Розкладання карбонату	1122.336	0.602
Всього	186371.029		Тепло заліза, що виносіться газами	411.764	0.221
Разом	100		Тепло виводу	2802.64	1.504
			Теплові втрати	7454.841	4
			Всього	186371.029	100

Нев'язка, % 0

Fig. 6 – Heat balance of smelting

Кінцевий склад металу

Елемент	Вміст, %
[C] _{tot}	0.122
[Si] _{tot}	0.068
[Mn] _{tot}	0.369
[S] _{tot}	0.025
[P] _{tot}	0.031

Fig. 7 – Final metal composition

An important element of the calculation, which indicates its accuracy, is the residual indicator. For the industrial version, the indicator of the discrepancy of the material-heat balance should not exceed 0.1%, for the educational version - no more than 0.5%.

At the moment, the application is hosted on the local server of the State University of Economics and Technology and is undergoing the last stages of testing. The actual tasks for improving the service is to launch a separate server to store user-defined calculation results, introduction of the possibility of graphical comparison of heats with different charge materials, functions for creating graphs to study the influence of various factors on melting parameters, adding the main languages of the European Union.

Conclusions

The article analyzes the latest software and hardware solutions for the modern oxygen-converter process, shows examples of their implementation and practical benefits from their use in real industrial conditions.

The development of the Department of Metallurgical Technologies together with colleagues from other universities is presented. The created web service for calculating the material and thermal balance of oxygen-converter smelting represents a new solution for the industry. The popular programming language used during development, as well as the ability to connect industrial systems to the service to obtain the results of parallel calculations, make it a convenient solution for metallurgical enterprises.

References

- [1] C. Wang, C. Zhao, G. Ding, X. Chen, K. Dong, and R. Zhu, "Research and Analysis of Parameters for the Bottom-Blown O₂-CO₂-CaO Process in BOF Converter Based on the Material and Heat Balance Models," in *The Minerals, Metals & Materials Series*, Cham, 2025, pp. 3–14. doi: 10.1007/978-3-031-80680-3_1.
- [2] M. J. Sun, and H. Kim, "A study of heat and material balances in direct reduction plant with various conditions," in *Proc. of the 12th Int. Conf. of Molten Slags*,

- Fluxes and Salts (MOLTEN 2024)*, Brisbane, Australia, June 17-19, 2024, pp. 685–689. doi: **10.62053/eswo9966**.
- [3] X. Wang, L. Wang, G. Liu, W. Mu, and K. Liu, “Energy balance of BOF converter during swirl-type oxygen lance blowing process,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 32, pp. 2744–2756, 2025. doi: **10.1007/s42243-025-01525-1**.
- [4] C. Wang, M. Brämmering, and M. Larsson, “Numerical Model of Scrap Blending in BOF with Simultaneous Consideration of Steel Quality, Production Cost, and Energy Use,” *Steel Research International*, vol. 84, no. 4, pp. 387–394, 2012. doi: **10.1002/srin.201200185**.
- [5] E. Sigarev, Y. Lobanov, S. Semiryagin, and A. Pohvalitiy, “Modeliuvannia plavlennia metalobrukhtu riznoi shchilnosti u kysnevo-konverternii plavtsi” [“Modeling the melting of scrap metal of different density in a bof smelting”], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, vol. 2, no. 37, pp. 3–8, 2021. doi: **10.31319/2519-2884.37.2020.1**. (Ukr.)
- [6] D. Makarenko et al., “Construction of a kinetic equation of carbon removal for controlling steel melting in the metallurgical system “cupola furnace – small converter”,” *Technology audit and production reserves*, vol. 2, no. 1(82), pp. 19–23, 2025. doi: **10.15587/2706-5448.2025.325695**.
- [7] K. Cai, K. Feng, D. He, L. Yang, and M. Zhang, “Incorporation of Control Parameters into a Kinetic Model for Decarburization During Basic Oxygen Furnace (BOF) Steelmaking,” *Processes*, vol. 13, no. 10, article 3048, 2025. doi: **10.3390/pr13103048**.
- [8] S. Chanouian, B. Ahlin, A. Tillander, and M. Ersson, “A Fundamental Investigation Of Decarburization Reactions In The Aod Converter Using Coupled CFD And Thermodynamics Databases,” *Steel Research International*, vol. 93, iss. 12, article 2200156, 2022. doi: **10.1002/srin.202200156**.
- [9] A. H. Chernyatevych, L. S. Molchanov, V. V. Vakulchuk, and P. O. Yushkevich, “Fyzyko-khymicheskye protsessy v polosty kyslorodnoho konvertera pry produvke vanny s dozhyhanyem otkhodiashchykh hazov” [“Physical and chemical processes in the cavity of the oxygen converter when burning the bath with the afterburning of exhaust gases”], *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii – Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 33, pp. 116–128, 2019. doi: **10.52150/2522-9117-2019-33-116-128**. (Rus.)
- [10] L. V. Kamkina, A. P. Mishalkin, V. Yu. Kamkin, Y. V. Mianovska, O. I. Dvorkovy, and L. E. Isaeva, “Modeliuvannia vplyvu rezhymu produvannia vanny na masoobminni protsesy ta shlakoutvorennia u kysnevomu konverteri” [“Modeling of the influence of the bath blowing mode on mass exchange processes and slag formation in the oxygen converter”], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, vol. 1, pp. 27–37, 2022. doi: **10.34185/tpm.1.2022.04**. (Ukr.)
- [11] Y. Mariash, and O. Stepanets, “Optimal control of the blowing mode parameters during basic oxygen furnace steelmaking process,” *Modeling Control and Information Technologies*, no. 5, pp. 94–96, 2021. doi: **10.31713/mcit.2021.30**.
- [12] M. A. Barron, D. Y. Medina, and I. Hilerio, “CFD Analysis of Influence of Slag Viscosity on the Splashing Process in an Oxygen Steelmaking Converter,” *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, vol. 03, no. 03, pp. 90–93, 2013. doi: **10.4236/mnsm.2013.33012**.
- [13] F. Qi et al., “Numerical Study on Droplet Splashing Behavior of Slag-Splashing for Converter Protection Using Volume of Fluid-Discrete Phase Model Two-Way Conversion Model,” *Steel Research International*, vol. 96, iss. 3, article 2400289, 2024. doi: **10.1002/srin.202400289**.
- [14] L. Molchanov, V. Kislyakov, K. Chubin, A. Pohvalitiy, and O. Chubina, “Perspektyvy vykorystannia tekhnolohii pozapichnoho rafinuvannia chavunu v konteksti vitchyznianoho metalurhiinoho vyrobnytstva” [“Prospects for the use of out-of-furnace cast iron refining technologies in the context of domestic metallurgical production”], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, vol. 2, no. 43, pp. 28–38, 2023. doi: **10.31319/2519-2884.43.2023.3**. (Ukr.)
- [15] Delyamure S. Modern solution for optimizing the logistics of the oxygen-converter plant. *Modern technologies of steel production: Ukrainian steelmakers conference*, Kryvyi Rih, 27-28 November 2014. 21 p.
- [16] Delyamure S. Rapid melt tapping using a probe lance and a 1st level converter control system. *Modern technologies of steel production: Ukrainian steelmakers conference*, Kryvyi Rih, 27-28 November 2014. 16 p.
- [17] Hüsken R. Monitoring the end of the oxygen converter purging process. *Modern technologies of steel production: Ukrainian steelmakers conference*, Kryvyi Rih, 27-28 November 2014. 39 p.
- [18] Mameshin V. S. Predicting the results of converter smelting when changing technological parameters (NMetAU). *Modern technologies of steel production: Ukrainian steelmakers conference*, Kryvyi Rih, 27-28 November 2014. 13 p.

РОЗРОБКА СЕРВІСУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МАТЕРІАЛЬНОГО ТА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ВИПЛАВКИ СТАЛІ

Чупринов Є.В.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua ;
Кассім Д.О.	д-р техн. наук, професор, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Грибков Є.П.	д-р техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1565-6294 , e-mail: eduard.gribkov@mipolytech.education ;
Малий Х.В.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education ;
Рєков Ю.В.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0318-0168 , e-mail: yuriy.rekov@mipolytech.education

У статті проведено комплексний аналіз сучасного стану автоматизації киснево-конвертерного процесу (BOF). Відзначається, що сучасна металургія характеризується переходом від простого збору даних сенсорами до впровадження складних програмних комплексів, здатних керувати багатофакторними технологіями в режимі реального часу. Дослідження підкреслює, що точність розрахунку матеріальних та теплових балансів є фундаментом для прогнозування хімічного складу металу, оптимізації витрат енергії та зменшення собівартості продукції. В огляді літератури висвітлено інноваційні підходи до моделювання: використання кінетичних рівнянь, обчислювальної гідродинаміки (CFD) та алгоритмів машинного навчання (XGBoost, Random Forest) для передбачення вмісту вуглецю та кисню. Особлива увага приділяється адаптації моделей до нових екологічних технологій, зокрема використання водню та переробки металобрухту, частка якого в шихті може сягати 40 %. Окремо розглянуто досвід світових лідерів (Danieli Corus, Kuttner) та вітчизняних наукових шкіл (НМетАУ) у створенні систем підтримки прийняття рішень, таких як «Порадник технолога-оператора». Представлена власна розробка кафедри металургійних технологій ДУЕТ та «Метінвест Політехніки» – універсальний сервісу для розрахунку балансів плавки. Програмний продукт побудований на базі сучасного стеку технологій (HTML, CSS, JavaScript) із використанням платформи Node.js для серверної частини. Такий вибір інструментарію забезпечує кросплатформеність, легку інтеграцію з наявними промисловими системами та можливість дистанційного доступу, що є критично важливим для навчання інженерів в умовах пандемічних обмежень. Сервіс реалізовано у двох режимах: «полегшеному» (для освітніх цілей) та «промислому» (з повним урахуванням усіх елементів шихти). Програма дозволяє оперативню вводити дані про склад чавуну, брухту, феросплавів та отримувати фінальні таблиці балансів із похибкою не більше 0,1-0,5 %. Автори наводять приклади програмного коду та інтерфейсу системи, демонструючи механізми перевірки хімічного складу шихти та формування підсумкових звітів. У висновках окреслено перспективи розвитку проєкту, що включають запуск окремих серверів для зберігання клієнтських даних, впровадження інструментів графічного аналізу впливу різних факторів на плавку та локалізацію інтерфейсу мовами ЄС. Робота має високу практичну цінність як для виробничого сектору, так і для цифровізації профільної вищої освіти.

Ключові слова: киснево-конвертерний процес; матеріальний та тепловий баланс; автоматизація металургії; вебсервіс; прогнозування хімічного складу; цифровізація виробництва; математичне моделювання; Node.js.

Перелік використаних джерел

- [1] Research and Analysis of Parameters for the Bottom-Blown O₂-CO₂-CaO Process in BOF Converter Based on the Material and Heat Balance Models / C. Wang et al. *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham, 2025. Pp. 3–14. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-80680-3_1.
- [2] Sun M. J., Kim H. A study of heat and material balances in direct reduction plant with various conditions. *12th International Conference of Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN 2024) Proceedings*. 2024. Pp. 685–689. DOI: <https://doi.org/10.62053/eswo9966>.
- [3] Energy balance of BOF converter during swirl-type oxygen lance blowing process / X. Wang et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2025. Vol. 32. Pp. 2744–2756. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-025-01525-1>.
- [4] Wang C., Brämmering M., Larsson M. Numerical Model of Scrap Blending in BOF with Simultaneous Consideration of Steel Quality, Production Cost, and Energy Use. *Steel Research International*. 2012.

- Vol. 84, no. 4. Pp. 387–394. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200185>.
- [5] Моделювання плавлення металобрухту різної щільності у киснево-конвертерній плавці / Сігарьов Є. М., Лобанов Ю. С., Семірягін С. В., Похвалітий А. А. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2021. Vol. 2, no. 37. Pp. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.37.2020.1>.
- [6] Construction of a kinetic equation of carbon removal for controlling steel melting in the metallurgical system “cupola furnace – small converter” / D. Makarenko et al. *Technology audit and production reserves*. 2025. Vol. 2, no. 1(82). Pp. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325695>.
- [7] Incorporation of Control Parameters into a Kinetic Model for Decarburization During Basic Oxygen Furnace (BOF) Steelmaking / K. Cai et al. *Processes*. 2025. Vol. 13, no. 10. Article 3048. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13103048>.
- [8] A Fundamental Investigation Of Decarburization Reactions In The Aod Converter Using Coupled CFD And Thermodynamics Databases / S. Chanouian et al. *Steel Research International*. 2022. Vol. 93, iss. 12. Article 2200156. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202200156>.
- [9] Физико-химические процессы в полости кислородного конвертера при продувке ванны с дожиганием отходящих газов / Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Вакульчук В. В., Юшкевич П. О. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2019. Вип. 33. С. 116–128. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-116-128>.
- [10] Камкіна Л. В. Моделювання впливу режиму продування ванни на масообмінні процеси та шлакоутворення у кисневому конвертері. *Теорія і практика металургії*. 2022. Вип. 1. С. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2022.04>.
- [11] Mariiash Y., Stepanets O. Optimal control of the blowing mode parameters during basic oxygen furnace steelmaking process. *Modeling Control and Information Technologies*. 2021. No. 5. Pp. 94–96. DOI: <https://doi.org/10.31713/mcit.2021.30>.
- [12] Barron M. A., Medina D. Y., Hilerio I. CFD Analysis of Influence of Slag Viscosity on the Splashing Process in an Oxygen Steelmaking Converter. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2013. Vol. 03, no. 03. Pp. 90–93. DOI: <https://doi.org/10.4236/mnsm.2013.33012>.
- [13] Numerical Study on Droplet Splashing Behavior of Slag-Splashing for Converter Protection Using Volume of Fluid-Discrete Phase Model Two-Way Conversion Model / F. Qi et al. *Steel Research International*. 2024. Vol. 96, iss. 3. Article 2400289. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202400289>.
- [14] Молчанов Л. С. Перспективи використання технологій позапічного рафінування чавуну в контексті вітчизняного металургійного виробництва. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2023. Вип. 2, № 43. С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.43.2023.3>.
- [15] Delyamure S. Modern solution for optimizing the logistics of the oxygen-converter plant. *Proceedings of the Ukrainian steelmakers conference «Modern technologies of steel production»*, Kryvyi Rih, 27–28 November 2014. 21 p.
- [16] Delyamure S. Rapid melt tapping using a probe lance and a 1st level converter control system. *Proceedings of the Ukrainian steelmakers conference «Modern technologies of steel production»*, Kryvyi Rih, 27–28 November 2014. 16 p.
- [17] Hüskén R. Monitoring the end of the oxygen converter purging process. *Proceedings of the Ukrainian steelmakers conference «Modern technologies of steel production»*, Kryvyi Rih, 27–28 November 2014. 39 p.
- [18] Mameshin V. S. Predicting the results of converter smelting when changing technological parameters (NMetAU). *Proceedings of the Ukrainian steelmakers conference «Modern technologies of steel production»*, Kryvyi Rih, 27–28 November 2014. 13 p.

Стаття надійшла 04.01.2026

Стаття прийнята 28.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Development of the service for calculating the material and thermal balance of steel smelting / Ye. V. Churypnov et al. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 206–213. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359809>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ХОЛОДНОКАТАНОГО ПРОКАТУ
З КИПЛЯЧИХ МАРОК СТАЛІ

Пашинська О.Г. д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя; пров. наук. співробітник, Донецький фізико-технічний інститут імені О. О. Галкіна НАН України, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7102-1544>, e-mail: e.g.pashinskaya@mipolytech.education

У роботі проведено комплексне дослідження нестабільності механічних властивостей холоднокатаних сталей марок 08кп та DC01, виготовлених в умовах мартенівського виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Проблема стабільності структури та властивостей металевих матеріалів протягом тривалого часу є однією з центральних у сучасній металургії та матеріалознавстві. Актуальність дослідження обумовлена високою чутливістю киплячих сталей до процесів деформаційного старіння через відсутність у їхньому складі алюмінію та наявність вільного азоту. Мартенівська сталь характеризується специфічним вмістом газів та неметалевих включень, що робить її більш чутливою до нестабільності властивостей у часі порівняно зі спокійними марками сталі. Об'єктом дослідження є механічні властивості низьковуглецевих сталей, які змінюються внаслідок старіння металу та обумовлюють основні якісні характеристики прокату. Дослідження проведені на відпаленому та потім продресированому з обтисненням 1% холоднокатаному прокаті. Зразки зберігалися при кімнатній температурі, а випробування на розрив проводилися щотижня протягом пів року. На основі отриманих даних за допомогою середовища Microsoft Excel були побудовані регресійні криві зміни механічних властивостей сталей у часі. Встановлено, що протягом шести місяців природного старіння найбільш суттєвих змін зазнає межа плинності, яка зростає в середньому на 10% (20–35 МПа). Значне зростання межі плинності спостерігається після 30 діб зберігання. Показники межі міцності та відносного подовження демонструють вищу стабільність і змінюються не суттєво. Фізична природа цього явища в досліджуваних сталях пов'язана з міграцією вільних атомів вуглецю та азоту до дислокацій з утворенням «атмосфер Коттрелла», які блокують рух дислокацій при початковій стадії пластичної деформації. Оскільки сталь мартенівської виплавки не містить алюмінію, який міг би зв'язати азот у стабільні нітриди, процеси старіння розвиваються інтенсивніше, ніж у спокійних конвертерних сталях. Виявлено, що додатковий розкид властивостей пов'язаний з природною ліквідацією хімічних елементів (C, Mn, S, P) по довжині та ширині рулону, про що свідчить низький коефіцієнт детермінації R^2 кривих старіння. Отримані результати дозволяють уточнити гарантійні терміни зберігання прокату та надати рекомендації споживачам щодо термінів його переробки для запобігання зниженню штампованості металу.

Ключові слова: кипляча сталь; регресійна модель; природне старіння; межа плинності; якість прокату; холоднокатаний прокат; хімічна неоднорідність.

Постановка проблеми

Проблема стабільності структури та властивостей металевих матеріалів протягом тривалого часу є однією з центральних у сучасній металургії та матеріалознавстві. Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених сталям конвертерної виплавки, особливості старіння прокату з киплячих сталей мартенівської виплавки потребують додаткового уточнення. Мартенівська сталь характеризується специфічним вмістом газів та неметалевих включень, та відсутністю у її складі алюмінію, який запобігає процесам старіння. Крім того, наявність вільного азоту в киплячих марках (08кп) робить їх більш чутливими до нестабільності властивостей у часі порівняно зі спокійними марками сталі. Розуміння механізмів старіння саме для киплячих марок сталі мартенівської виплавки 08кп, DC01 дозволить точніше прогнозувати терміни зберігання прокату для пригнічення негативних ефектів старіння.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження процесів старіння охоплюють широкі кола матеріалів: від алюмінієвих сплавів [1] та

наплавлених металів типу сормайт [2] до жароміцних корозійностійких сплавів [3]. Як показує досвід вивчення складних систем, термічна обробка та умови охолодження радикально впливають на подальшу фазову стабільність [1, 4, 5].

Для сталей, що використовуються у відповідальних конструкціях, таких як магістральні газопроводи або енергоблоки АЕС, процеси старіння та структурної деградації є критичними факторами безпеки [6–8]. Багаторічна експлуатація призводить до накопичення пошкоджень, що детально описано в роботах, присвячених деградації трубних сталей [9].

Старіння низьковуглецевих конструкційних сталей має свою специфіку, пов'язану з дифузією атомів впровадження. У сучасній закордонній літературі значна увага приділяється довготривалим ефектам деформаційного старіння [10, 11] та їх впливу на механічні властивості сталі за умов високих швидкостей навантаження [12].

Дослідники зазначають, що деформаційне старіння не лише змінює статичну міцність, а й впливає на втомну витривалість металу, що залежить від розміру зерна [13, 14]. Зокрема, для частково пошкодженої

структури сталі ефект старіння може виступати як фактор додаткового зміцнення, так і як чинник зниження пластичності [15].

Мета статті

Метою даної роботи є комплексне дослідження зміни механічних властивостей холоднокатаного прокату з киплячих сталей марок 08кп та DC01 мартенівської виплавки в процесі природного старіння. Щоб більш наглядно оцінити розбіг хімічного складу по ширині та довжині рулону (особливо по головному зміцнюючому елементу – вуглецю) дослідження зміни хімічного складу по ширині та довжині рулону провели на холоднокатаному рулоні сталі марки 3пс (яка відрізняється більшим вмістом вуглецю ніж сталі 08кп та DC01).

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є механічні властивості низьковуглецевих сталей, які змінюються внаслідок старіння металу та обумовлюють основні якісні характеристики прокату.

Дослідження проведені на відпаленому та потім продресированому (з обтисненням 1%) холоднокатаному прокаті мартенівської виплавки (з розливанням сталі у зливки) виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Від двох рулонів марок сталі 08кп та DC01 товщиною 1,5мм (ковшовий хімічний склад сталі наведений у таблиці 1) були відібрані карти металу, з яких виготовили по 26 зразків холоднокатаного металу для проведення випробувань на розрив. Зразки вирізали поперек напрямку вісі прокатки як це затверджено у нормативній документації.

Зразки зберігалися при кімнатній температурі. На випробувальній машині «AVERY» 7113DCJ/B/P-4908 кожен тиждень робили розривні випробування 1 зразка з фіксацією отриманого результату. Після випробувань всієї партії зразків за допомогою середовища Microsoft Excel були побудовані регресійні криві зміни механічних властивостей сталей у часі.

Хімічний аналіз, наведений у дослідженні, проводився за допомогою настільного спектрометра "SPECTROMAXx LMA10".

Таблиця 1

Хімічний склад плавки (за аналізом ковшової проби), на яких проводили дослідження.

Марка сталі	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
08кп	0,07	0,36	0,01	0,024	0,027
DC01	0,08	0,4	0,01	0,019	0,015
3пс	0,19	0,37	0,01	0,029	0,025

Для вивчення розподілу хімічних елементів у сталі в залежності від довжини та ширини прокату взяли також типову марку сталі 3пс, від якої відібрали проби на визначення хімічного складу від 5 горизонтів по ширині (крайка, 1/4 ширини, середина, 3/4 ширини та протилежна крайка) та 5 горизонтів по довжині рулону (початок смуги, 1/4 довжини смуги, середина по довжині смуги, 3/4 довжини смуги та кінець смуги). Ця марка сталі більш показова з точки зору розкиду значень хімічного складу по вуглецю, так як сталь 3пс відрізняється більшим вмістом вуглецю, ніж сталі 08кп та DC01.

Виклад основного матеріалу

Дослідження процесів старіння проведені на киплячих марках сталі мартенівського виробництва, у хімічному складі яких відсутній алюміній. Процеси старіння у таких марках розвиваються більш інтенсивно, ніж у спокійних конверторних сталях, в яких у хімічному складі присутній алюміній і хімічний склад яких наближений до нестаріючої марки сталі 08ю. Процес старіння досліджували на протязі пів року через те, що в середньому саме такий час холоднокатаний прокат знаходиться між виробництвом на комбінаті та виготовленням деталей з нього у споживача.

З аналізу наведених на графіках рис. 1 та рис. 2 регресійних моделей можна зауважити:

1. Процес старіння оказує найбільший вплив саме на межу плинності холоднокатаного прокату, збільшуючи її в середньому на ~ 20-35 МПа (або ~ 10%) на протязі півроку. Особливо великий ріст межі плинності спостерігається після 30 діб зберігання. Вплив старіння на межу міцності не такий значний та знаходиться десь на межі ~ 5-20 МПа (або ~ 3,5%) за півроку. Несуттєво впливає старіння на величину відносного подовження, воно, як показують графіки, змінюється незначно.

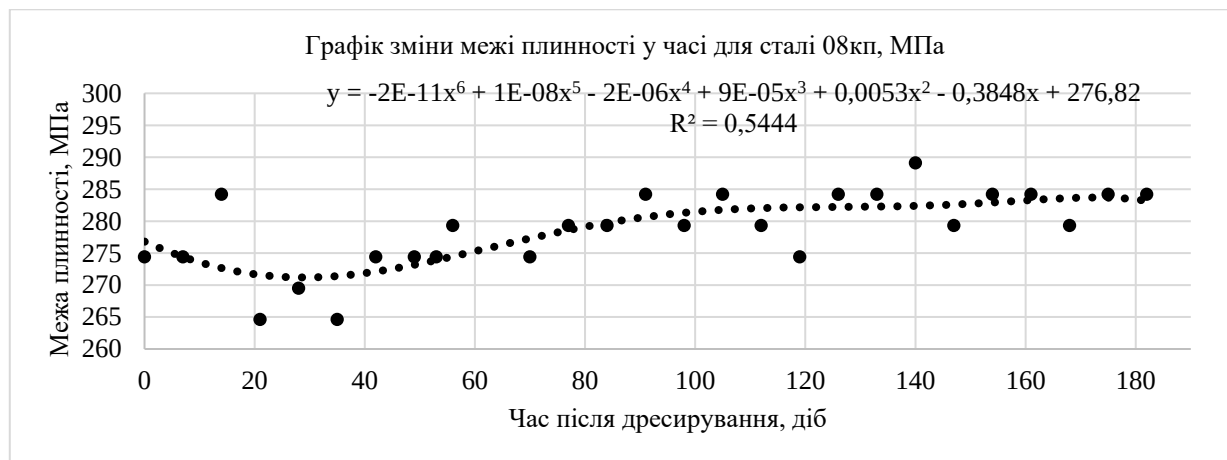
2. Спостережуване зростання межі плинності при відносно стабільній межі міцності є класичною ознакою деформаційного старіння, що розвивається в часі. Фізична природа цього явища в досліджуваних сталях 08кп та DC01 пов'язана з міграцією вільних атомів вуглецю та, переважно, азоту до дислокацій.

Оскільки сталь мартенівської виплавки не містить алюмінію, який міг би зв'язати азот у стабільні нітриди, вільний азот залишається в твердому розчині фериту. З плином часу ці атоми впровадження утворюють навколо дислокацій так звані «атмосфери Коттрелла», які блокують рух дислокацій при початковій стадії пластичної деформації. Це призводить до ефекту «закріплення» дислокацій, що на макрорівні проявляється як різке підвищення зусилля, необхідного для початку руху дислокацій металу.

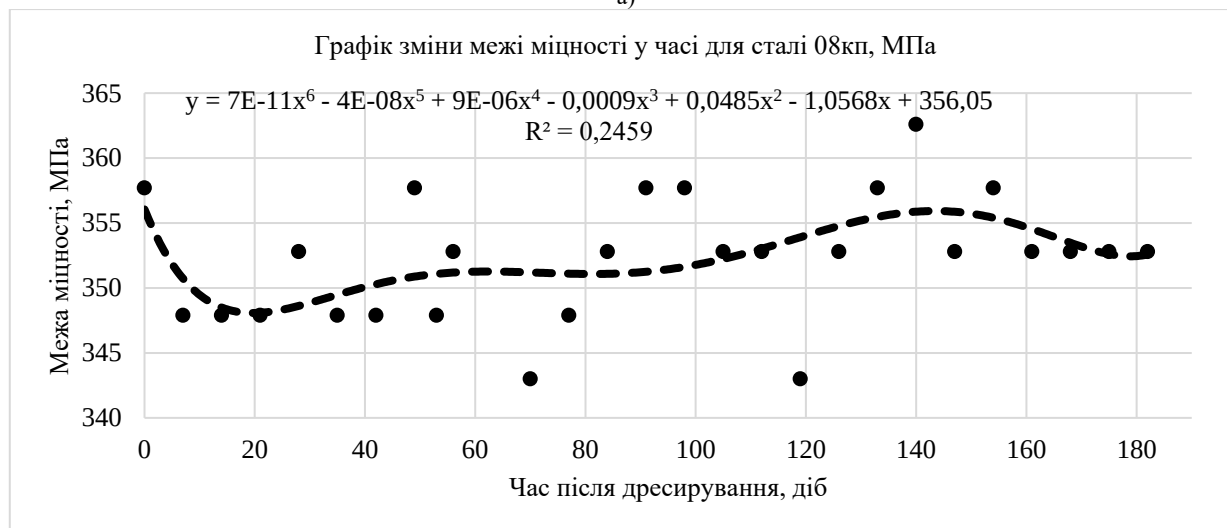
Нижчий рівень стабільності властивостей киплячих сталей порівняно зі спокійними (наприклад, 08ю) пояснюється саме відсутністю бар'єрів для дифузії азоту. Отримані дані підтверджують, що після

дресування тимчасово усувається майданчик плинності. Але через 2–4 тижні процеси старіння

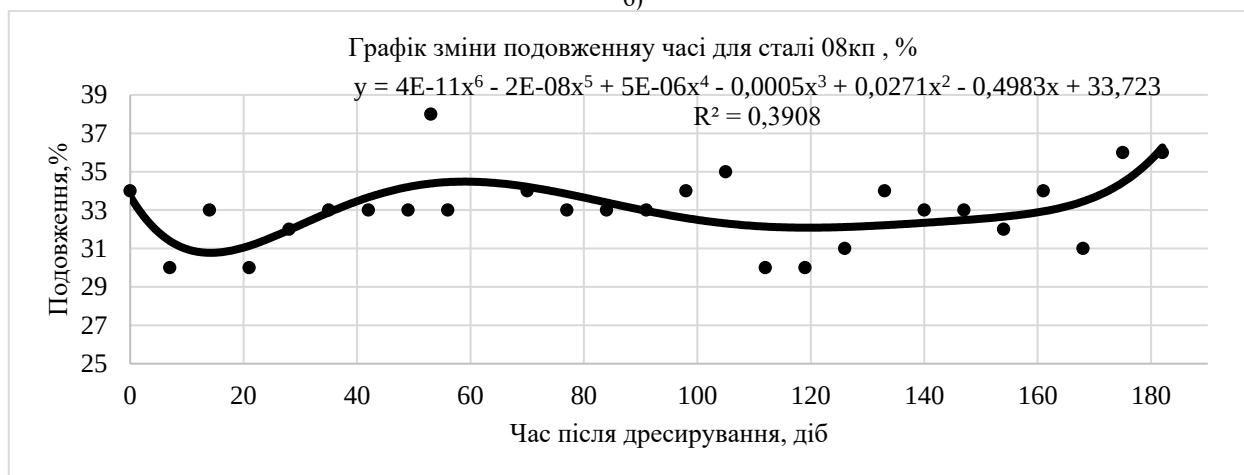
відновлюються, що критично для споживачів, які використовують глибоку витяжку.



а)



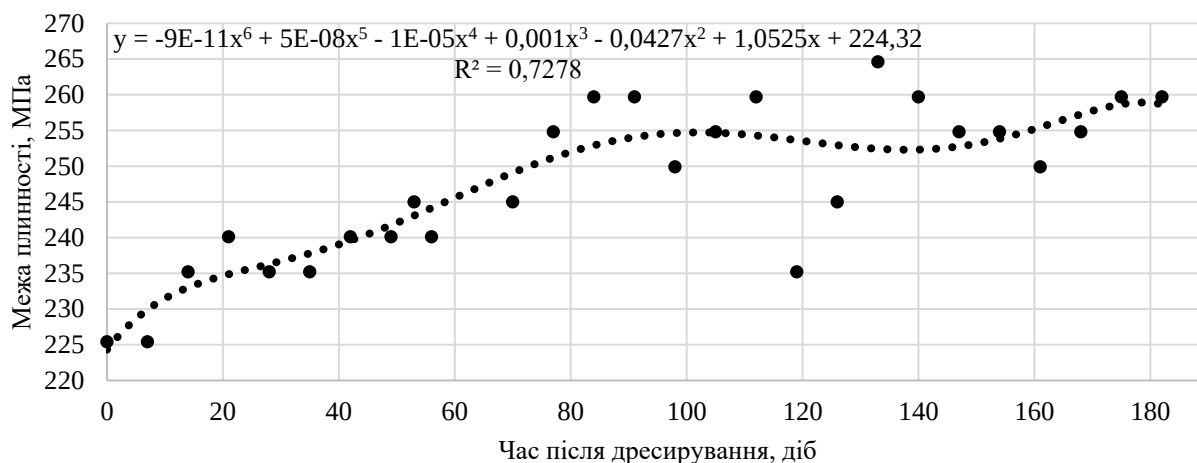
б)



в)

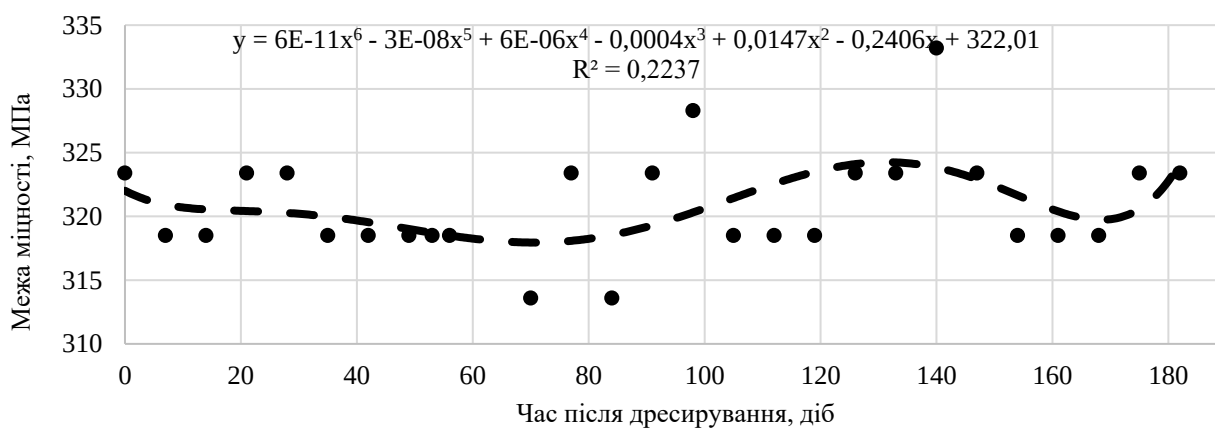
Рис. 1 – Графіки зміни механічних властивостей у часі сталі марки 08кп: а) межа плинності; б) межа міцності; в) відносне подовження

Графік зміни межі плинності у часі для сталі DC01, МПа



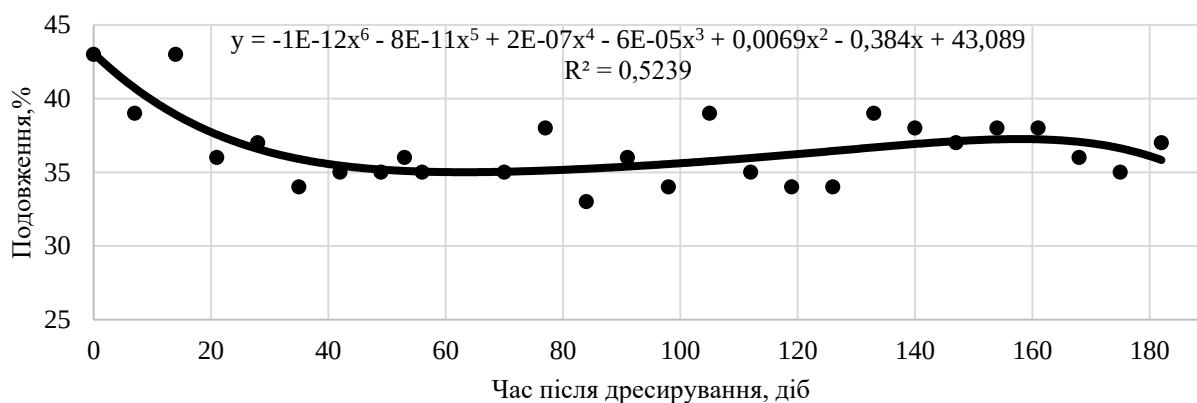
а)

Графік зміни межі міцності у часі для сталі DC01, МПа



б)

Графік зміни подовження у часі для сталі DC01, %



в)

Рис. 2 – Графіки зміни механічних властивостей у часі сталі марки DC01: а) межа плинності; б) межа міцності; в) відносне подовження

3. Наведені криві механічних властивостей мають досить низький коефіцієнт детермінації:

- криві межі плинності – $R^2 = 0,544-0,728$;
- для кривих межі міцності – $R^2 = 0,246-0,224$;
- для подовження – $R^2 = 0,391-0,524$.

Розкид значень (низький R^2), окрім похибок вимірювання, значною мірою може бути зумовлений мікронеоднорідністю структури, що характерно для великих зливків мартенівської сталі. Для підтвердження ідеї впливу цього чинника на розкид значень було проведено окреме додаткове дослідження на сталі марки Зпс.

Результати наведені на графіках, зображених на рис. 3 та рис. 4, та показують:

1. Максимальне коливання вуглецю по ширині штаби становить 0,05% або 26,6% по ширині штаби. Розкид значень по ширині та довжині смуги становив від 0,01 до 0,05%, при рівні (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,14–0,21%.

2. Максимальне коливання вмісту марганця по ширині штаби становить 0,03% або 8,2% по ширині штаби. Розкид значень від 0,01 до 0,03%, за рівня (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,35–0,38%.

3. Максимальне коливання вмісту фосфору по ширині штаби становить 0,004% або 16,8% по ширині штаби. Розкид значень від 0,001 до 0,004%, за рівня (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,021–0,026%.

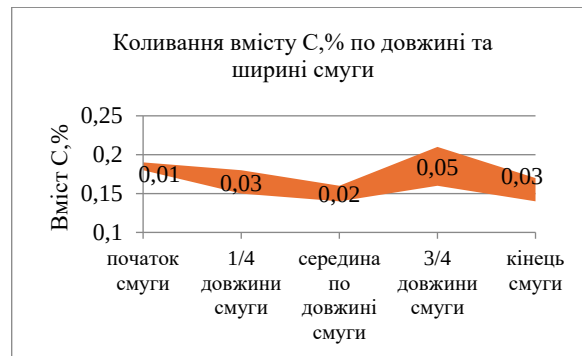
4. Максимальне коливання вмісту сірки по ширині штаби становить 0,007% або 23% по ширині штаби.

Розкид значень від 0,002 до 0,007%, за рівня (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,021–0,033%. За іншими елементами розбіг значень становив 0%, які значення склали: Si-0,01%, Cr-0,03%, Ni-0,02%, Cu-0,02%.

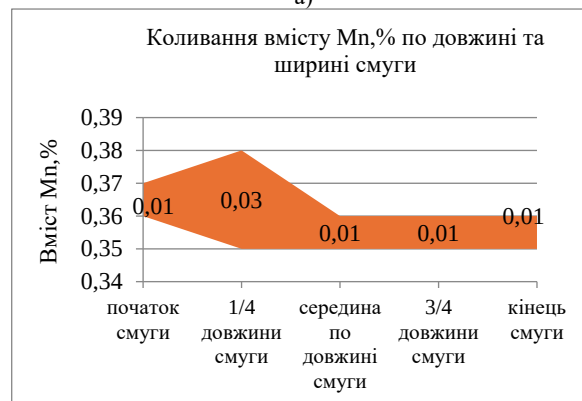
Як видно, коливання хімічного складу основних зміцнюючих елементів сталі по ширині однієї й тієї ж ділянки смуги складає 8,2–23%, що, відповідно, спричиняє коливання механічних властивостей цієї смуги (рис. 4):

- межі плинності – на 14,7 МПа або на 5,2%, при цьому рівень цього показника (мінімум – максимум по всіх горизонтах) становив: $\sigma_T = 269,5-308,7$ МПа;
- межі міцності – на 9,8 МПа або на 2,4%, при цьому рівень цього показника (мінімум – максимум по всіх горизонтах) становив: $\sigma_B = 396,9-436,1$ МПа;
- відносного подовження – 3% або на 10%, при цьому рівень цього показника (мінімум – максимум по всіх горизонтах) становив: $\delta_4 = 28-33\%$.

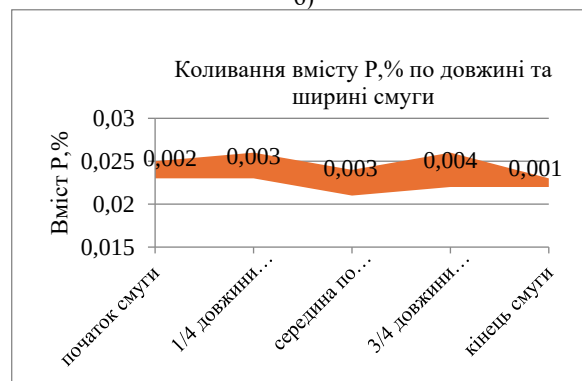
Проведені випробування зміни хімічного складу в межах одного холоднокатаного рулону сталі марки Зпс мартенівської виплавки з розливанням у зливки підтвердили значні коливання хімічних елементів по довжині та ширині рулону, зокрема по ширині ці коливання складали 8,2–23%. Встановлено, що саме цей фактор відповідно впливає й на розкид результатів механічних властивостей сталі.



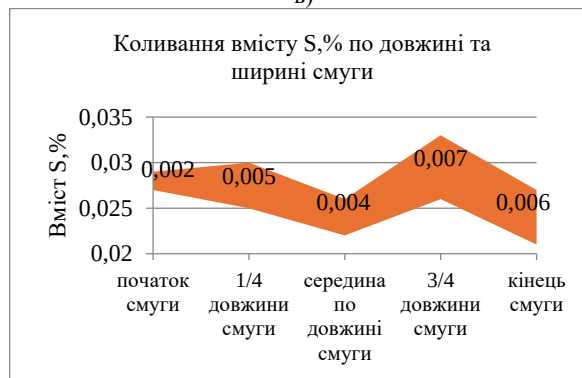
а)



б)

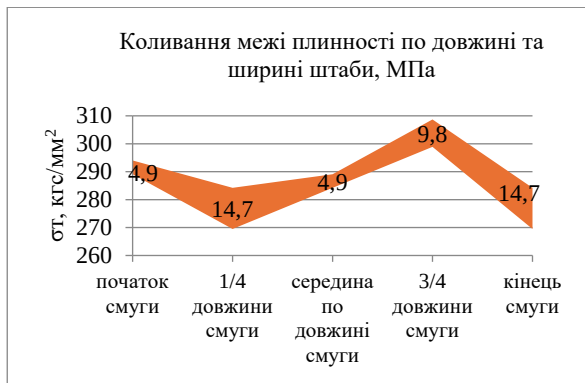


в)

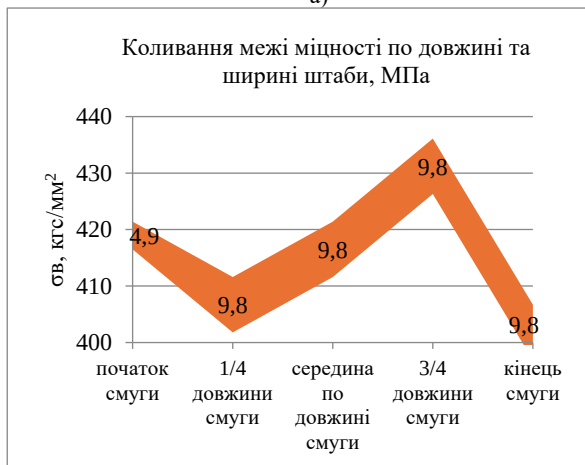


г)

Рис. 3 – Графік коливання основних хімічних елементів по ширині та довжині холоднокатаного рулону сталі марки Зпс: а) вуглецю; б) марганцю; в) фосфору; г) сірки



а)



б)



в)

Рис.4 – Графік коливання механічних властивостей сталі марки 3пс по довжині та ширині штаби: а) межа плинності; б) межа міцності; в) відносне подовження

Висновки

1. В ході проведеної роботи досліджено зміну механічних властивостей холоднокатаного відпаленого та потім продресированого прокату найбільш затребуваних низьковуглецевих марок сталі 08кп та DC01 на протязі півроку. Встановлено, що процес старіння

більш за все впливає на межу плинності, зміцнюючи метал на 20-35 МПа.

2. Показано, що процес природного старіння має обмежений вплив на межу міцності та відносне подовження. Протягом півроку зміна межі міцності становить лише близько 3,5%, що є технічно малозначущим. Аналогічна тенденція спостерігається і для показників відносного подовження, які змінювалися незначно.

3. Для запобігання проблем росту межі плинності з часом низьковуглецевих марок сталі 08кп та DC01 можна рекомендувати споживачам металопродукату з мартенівської сталі проводити його переробку у стислі терміни (до 30 діб). Це особливо важливо, якщо метал виробляється за Євростандартом, де регламентується межа плинності цих сталей.

Перелік використаних джерел

- [1] Лабур Т. М., Яворська М. Р., Коваль В. А. Вплив термічної обробки на структуру і механічні властивості тонколистового алюмінієвого сплаву В1341 та його зварних з'єднань, виконаних тіг зварюванням. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 7. С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.03>.
- [2] Структура та властивості наплавленого металу сплаву типу Сормайт-1 після природного старіння / Ч. В. Пулька та ін. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 6. С. 18–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.06.03>.
- [3] Фазово-структурна стабільність жароміцного корозійностійкого сплаву для литих робочих лопаток ГТУ / А. М. Верховлюк та ін. *Металознавство та обробка металів*. 2016. № 3. С. 3-9.
- [4] Скрябінський В.В., Нестеренков В.М., Русиник М.О. Вплив термічної обробки на механічні властивості з'єднань при електронно-променевому зварюванні сплаву 2219. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 12. С. 48-52. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.12.07>.
- [5] Грабовський В. Я., Шило Д. О. Ефективність сходинкового старіння сплаву з інтерметалідно-карбідним зміцненням для інструментів гарячого деформування металів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 2. С. 14–18.
- [6] Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчина та ін. *Проблеми прочності*. 2009. № 5. С. 66-72.
- [7] Черноусенко О. Ю., Нікуленкова Т. В., Нікуленков А. Г. Етапи реалізації управління старінням елементів енергоблоків АЕС. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 9(1181). С. 85-89. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.09.12>.

- [8] Мандрик О. М. Аналіз причин аварійних ситуацій та руйнувань магістральних газопроводів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Том 25, № 1. С. 155-162.
- [9] Миндюк В.Д. Дослідження особливостей структурної деградації тривало експлуатованих трубних сталей. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2015. № 2(39). С. 101-110.
- [10] Long-term strain ageing effects on low-carbon structural steels / F. Xu et al. *Journal of Constructional Steel Research*. 2025. Vol. 231. Article 109579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109579>.
- [11] Loporcaro G., Pampanin S., Kral M. V. Long-term strain-ageing effects on low-carbon steel reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228. Article 116606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.332>.
- [12] Strain ageing effect on the temperature dependent mechanical properties of partially damaged structural mild-steel induced by high strain rate loading / Hosseini S., Heidarpour A., Collins F., Hutchinson C. R. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 123. Pp. 454–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.001>.
- [13] Chong C. J. The effects of strain ageing and grain size on fatigue in low carbon steels : Dissertation Doctor of Philosophy. Christchurch : University of Canterbury, 1980. 261 p.
- [14] Sarnet J. Some measurements of the ageing of a carbon steel. 2024. 51 p.
- [15] Effect of strain ageing on the mechanical properties of partially damaged structural mild steel / Hosseini S., Heidarpour A., Collins F., Hutchinson C. R. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 83-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.021>.

RESEARCH INTO THE AGEING PROCESSES OF COLD-ROLLED PRODUCTS MADE FROM BOILING STEEL GRADES

Pashynska O.

D.Sc. (Engineering), senior research fellow, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia; leading researcher, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O. O. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7102-1544>, e-mail: e.g.pashinskaya@mipolytech.education

The paper presents a comprehensive study of the instability of the mechanical properties of cold-rolled steels of grades 08kp and DC01 manufactured in the open-hearth production facilities of PJSC Zaporizhstal. The problem of the stability of the structure and properties of metallic materials over a long period of time is one of the central issues in modern metallurgy and materials science. The relevance of the study is due to the high sensitivity of boiling steels to deformation ageing processes due to the absence of aluminium in their composition and the presence of free nitrogen. Open-hearth steel is characterised by a specific content of gases and non-metallic inclusions, which makes it more sensitive to instability of properties over time compared to calm steel grades. The object of the study is the mechanical properties of low-carbon steels, which change as a result of metal ageing and determine the main quality characteristics of rolled products. The research was conducted on annealed and then pre-stretched cold-rolled steel with 1% compression. The samples were stored at room temperature, and tensile tests were conducted weekly for six months. Based on the data obtained, regression curves of changes in the mechanical properties of steels over time were constructed using Microsoft Excel. It was found that during six months of natural ageing, the most significant changes occur in the yield strength, which increases by an average of 10% (20–35 MPa). A significant increase in yield strength is observed after 30 days of storage. The tensile strength and relative elongation values demonstrate higher stability and do not change significantly. The physical nature of this phenomenon in the steels studied is associated with the migration of free carbon and nitrogen atoms to dislocations with the formation of ‘Cottrell atmospheres,’ which block the movement of dislocations at the initial stage of plastic deformation. Since open-hearth steel does not contain aluminium, which could bind nitrogen into stable nitrides, ageing processes develop more intensively than in calm converter steels. It has been found that the additional spread of properties is associated with the natural segregation of chemical elements (C, Mn, S, P) along the length and width of the coil, as evidenced by the low coefficient of determination R² of the ageing curves. The results obtained allow us to refine the warranty terms for rolled products and provide recommendations to consumers regarding the terms of its processing to prevent a decrease in the stampability of the metal.

Keywords: boiling steel; regression model; natural ageing; yield strength; rolled product quality; cold-rolled products; chemical heterogeneity.

References

- [1] T. M. Labur, M. R. Yavorska, and V. A. Koval, "Vplyv termichnoi obrobky na strukturu i mekhanichni vlastyivosti tonkolystovoho aliuminiievroho splavu V1341 ta yoho zvarnya ziednan, vykonanykh tig zvaryuvanniam" ["Effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of thin-sheet aluminum alloy V1341 and its welded joints made by TIG welding"], *Avtomatychne zvaryuvannia – Automatic Welding*, no. 7, pp. 25–31, 2020. doi: 10.37434/as2020.07.03.
- [2] Ch. V. Pulka, V. S. Senchyshyn, I. B. Okipnyi, Vit. S. Senchyshyn, and R. T. Bishchak, "Struktura ta vlastyivosti naplavlennoho metalu splavu typu Sormait-1 pislia pryrodnoho starinnia" ["Structure and properties of the deposited metal of the Sormait-1 type alloy after natural aging"], *Avtomatychne zvaryuvannia – Automatic Welding*, no. 6, pp. 18–20, 2023. doi: 10.37434/as2023.06.03.
- [3] A. M. Verkhovliuk, I. I. Maksuta, Yu. H. Kvasnytska, H. P. Mialnitsa, and O. V. Mykhniian, "Fazovostrukturna stabilnist zharomicnoho koroziinostiikoho splavu dlia lytykh robochykh lopatok HTU" ["Phase-structural stability of heat-resistant corrosion-resistant alloy for cast working blades of GTU"], *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metal Science and Treatment of Metals*, no. 3, pp. 3–9, 2016.
- [4] V. V. Skriabinskyi, V. M. Nesterenkov, and M. O. Rusynyk, "Vplyv termichnoi obrobky na mekhanichni vlastyivosti ziednan pry elektronno-promenevomu zvaryuvanni splavu 2219" ["Effect of heat treatment on the mechanical properties of joints in electron-beam welding of 2219 alloy"], *Avtomatychne zvaryuvannia – Automatic Welding*, no. 12, pp. 48–52, 2023. doi: 10.37434/as2023.12.07.
- [5] V. Ya. Hrabovskiy, and D. O. Shylo, "Efektyvnist skhidynchastoho starinnia splavu z intermetalidno-karbidnym zmitsnenniam dlia instrumentiv hariachoho deformuvannia metaliv" ["Efficiency of step aging of an alloy with intermetallic-carbide strengthening for tools of hot metal deformation"], *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, no. 2, pp. 14–18, 2019.
- [6] H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyryllyk, D. Yu. Petryna, and M. I. Hredil, "Dehradatsiia vlastyvostei stalei mahistralnykh hazoprovodiv uprodovzh yikh sorokarichnoi ekspluatatsii" ["Degradation of the properties of main gas pipeline steels during their forty-year operation"], *Problemy prochnosti – Problems of Strength*, no. 5, pp. 66–72, 2009.
- [7] O. Yu. Chernousenko, T. V. Nikulenkova, and A. H. Nikulenkova, "Etapy realizatsii upravlinnia starinniam elementiv enerhoblokov AES" ["Stages of implementation of aging management of NPP power unit elements"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Power and Thermal Engineering Processes and Equipment*, no. 9(1181), pp. 85–89, 2016. doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.12.
- [8] O. M. Mandryk, "Analiz prychnykh avariinykh sytuatsii ta ruinuivan mahistralnykh hazoprovodiv" ["Analysis of causes of emergency situations and destruction of main gas pipelines"], *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 25, № 1, pp. 155–162, 2015.
- [9] V. D. Myndiuk, "Doslidzhennia osoblyvostei strukturnoi dehradatsii tryvalo ekspluatovanykh trubnykh stalei" ["Study of features of structural degradation of long-operated pipe steels"], *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu – Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, no. 2(39), pp. 101–110, 2015.
- [10] F. Xu, J. Zhao, X. Zhou, X. Yun, J. Z. Liu, and T. Okazaki, "Long-term strain ageing effects on low-carbon structural steels," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 231, article 109579, 2025. doi: 10.1016/j.jcsr.2025.109579.
- [11] G. Loporcaro, S. Pampanin, and M. V. Kral, "Long-term strain-ageing effects on low-carbon steel reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 228, article 116606, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.332.
- [12] S. Hosseini, A. Heidarpour, F. Collins, and C. R. Hutchinson, "Strain ageing effect on the temperature dependent mechanical properties of partially damaged structural mild-steel induced by high strain rate loading," *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 454–463, 2016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.001.
- [13] C. J. Chong, "The effects of strain ageing and grain size on fatigue in low carbon steels," Ph.D. dissertation, Univ. of Canterbury, 1980.
- [14] J. Sarnet, *Some measurements of the ageing of a carbon steel*. 2024.
- [15] S. Hosseini, A. Heidarpour, F. Collins, and C. R. Hutchinson, "Effect of strain ageing on the mechanical properties of partially damaged structural mild steel," *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 83–93, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.021.

Стаття надійшла 24.02.2026

Стаття прийнята 13.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Пашинська О. Г. Дослідження процесів старіння холоднокатаного прокату з киплячих марок сталі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 214–221. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359810>.

УДК 621.74.047

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359811

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ У МАШИНАХ
БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

Чубенко В.А.

канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-0285>, e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua;

Ярош Т.П.

канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-9630>, e-mail: yarosh_tp@knu.edu.ua;

Хіноцька А.А.

ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-0583>, e-mail: khinotska_aa@knu.edu.ua

У статті запропоновано спосіб удосконалення процесу виготовлення безперервнолитого виробу за рахунок регульованої вібраційної дії на матеріал під час його кристалізації. Актуальність роботи зумовлена потребою в конструкційних матеріалах, що мають високу міцність, стійкість і надійність, які цілком визначаються внутрішньою будовою металовиробу. Метою роботи є покращення властивостей безперервнолитої заготовки шляхом застосування регульованого зовнішнього впливу на утворення внутрішньої будови виробу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: обґрунтувати спосіб поліпшення внутрішньої будови безперервнолитої заготовки з низьковуглецевої сталі за рахунок введення в зону кристалізації вібраційних коливань раціональної частоти; дослідити роботу пневмомеханічного генератора, що забезпечує стабільний вібраційний вплив заданої частоти на процес кристалізації в машині безперервного лиття заготовок. У роботі вдосконалено технологію безперервного лиття шляхом впровадження регульованого вібраційного впливу на процеси кристалізації та розроблено конструкцію обладнання для його практичного втілення. Для створення регульованих вібрацій безпосередньо під час розливки сталі запропоновано використовувати пневмомеханічні генератори, що дозволяють змінювати частоту коливань залежно від конкретних умов кристалізації та марки металу чи сплаву. Керування частотними характеристиками здійснюється шляхом варіювання тиску стисненого повітря на вході в генератор. Визначено, що для отримання високоякісних металовиробів із низьковуглецевої сталі марки Сталь 20 раціональний діапазон частот знаходиться в межах від 50 до 75 Гц. Пристрій пропонується розташовувати на відстані 0,3–0,35 м від торця кристалізатора. Запропонований спосіб забезпечує сприятливі умови формування металовиробів і дає змогу отримувати заготовки високої якості. Наукова новизна роботи полягає в теоретичному й експериментальному обґрунтуванні методу регулювання частоти коливань генератора за рахунок зміни тиску повітря. Обладнання для створення вібраційних хвиль відрізняється конструктивною простотою та надійністю в експлуатації. Його легко інтегрувати в діючі лінії безперервного лиття заготовок на металургійних підприємствах.

Ключові слова: кристалізація; вібраційна дія; пневмомеханічний генератор; регульована частота коливань; зона вторинного охолодження.

Постановка проблеми

В умовах розвитку металургійної та машинобудівної промисловості до металопродукції висувають високі вимоги щодо міцності та жорсткості, які безпосередньо зумовлюються її внутрішньою структурою. Тому дослідження способів поліпшення внутрішньої будови металів і сплавів та розробка заходів із покращення їхніх експлуатаційних властивостей є актуальним науково-практичним завданням.

Високу ефективність у галузі металургії та машинобудування продемонструвало застосування машин безперервного лиття заготовок [1]. Таке устаткування дозволяє отримувати значні обсяги металовиробів із різноманітних металів і сплавів. Безперервна розливка є однією з найбільш прогресивних технологій, оскільки забезпечує перехід рідкого матеріалу в кристалічний стан з одночасним наданням виробам заданої геометричної форми та розмірів [2]. Умови охолодження та затвердіння матеріалу в машинах безперервного лиття сталі значною мірою визначають високу якість

металопродукції порівняно з консервативною системою розливання металу та сплавів у зливки [3].

Для всіх типів машин, які здійснюють безперервне лиття металовиробів, провідними виробниками пропонуються комплексні технічні рішення, що поєднують високу продуктивність процесу з належною якістю отриманих виробів [4]. Модернізація обладнання триває безперервно, що обумовлено постійним зростанням вимог до фізико-механічних характеристик металопродукції та розширенням асортименту і марочного складу сталей. Водночас недостатньо вивченим залишається питання поліпшення внутрішньої структури матеріалів шляхом введення регульованих вібрацій у зону кристалізації.

Але необхідно зазначити, що питання поліпшення внутрішньої будови металів і сплавів шляхом введення регульованих вібрацій у зону кристалізації досліджено в недостатньо повній мірі.

У роботі пропонується забезпечити спрямовану кристалізацію безперервнолитої заготовки за

допомогою хвиль певної частоти, що створюються пневмомеханічним генератором.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технологія безперервної розливки металів і сплавів є прогресивним процесом виготовлення металовиробів, оскільки дозволяє суттєво скоротити капіталовкладення у зв'язку з виключенням витрат на виливниці й обтискне обладнання, що використовується під час дискретної розливки сталі [4]. Крім того, безперервна розливка матеріалу забезпечує збереження електричної енергії, що витрачається на підігрів зливоків у нагрівному колодязі в умовах дискретної розливки, сприяє поліпшенню умов праці обслуговуючого персоналу через зменшення екологічного навантаження на атмосферу та підвищенню якості продукції завдяки отриманню більш однорідної внутрішньої структури матеріалу. Використання безперервної розливки сталі забезпечує зменшення часу на виробництво продукції та зниження маси обладнання, що використовується в цеху, приблизно в 1,5 раза [2-4]. Безперервна розливка сталі зменшує на 15% витрати металу через відсутність обрізу головної та донної частин зливка. Разом з тим відбувається прискорення затвердіння матеріалу, що дозволяє досягти високого ступеня однорідності металовиробів і покращення якісних характеристик.

Значний вплив на техніко-економічні показники металургійних підприємств має вибір способу розливки рідкого матеріалу та його основних технологічних параметрів, зокрема температури охолодження та швидкості надходження розплаву до кристалізатора, оптимальних об'ємів і конструктивних особливостей обладнання тощо [5, 6].

Аналіз літературних джерел [5-8] свідчить про постійне вдосконалення будови та принципу дії обладнання для розливання та конструкцій машин безперервної розливки металів і сплавів. Дослідники пропонують різноманітні рішення щодо модернізації сталерозливних і проміжних ковшів, а також застосування більш досконалих вогнетривких матеріалів.

У машині безперервної розливки кристалізація матеріалу відбувається поступово в процесі його руху в кристалізаторі-охолоджувачі [1, 8], де рідкий сплав переходить у твердий стан. Під час зміни агрегатного стану матеріалу система прагне перейти до термодинамічно стійкого за даних умов стану, що характеризується мінімальною вільною енергією. Зміни в структурі матеріалу аналізують за допомогою діаграм фазової рівноваги [9, 10]. При затвердінні метал набуває кристалічної будови [11-13]. У випадках, коли кристалізація здійснюється з високою швидкістю при малій тривалості процесу, формується дендритна структура, що складається з розгалужених (деревоподібних) кристалів [14]. Форма таких кристалів залежить від напрямку відведення теплоти [15].

Внутрішня мікроструктура матеріалів має визначальний вплив на якість отриманих металовиробів, а

також їхні фізичні та механічні властивості. Від процесу кристалізації залежить можливість появи в структурі металу таких дефектів, як тріщини, пори, усадочні раковини тощо [9, 10]. У разі налипання матеріалу до кристалізатора можливе «зависання» виробу, що кристалізується, та подальший розрив його кірки. Це матиме негативні наслідки, оскільки погіршуватиме стан поверхні продукції та створюватиме ризик аварійних ситуацій під час розливання. Для запобігання цим явищам кристалізатору надають зворотно-поступального руху, що створюється шляхом коливання пристрою [3].

Покращення якісних характеристик металовиробів і підвищення продуктивності машин безперервної розливки матеріалу можливе завдяки впровадженню нових принципів керування кристалізацією металів і сплавів [7]. Особливо ефективними в досягненні цієї мети є методи зовнішнього впливу на метал у процесі твердіння. Одним із них є вібраційна обробка розплаву (ультразвукова, низько- або високочастотна) [6-8, 16]. Для введення коливань у безперервнолитий зливоч використовують різне устаткування: хвилеводи-випромінювачі, генератори хвиль, що діють на кристалізатор, тощо. Такі пристрої забезпечують формування ударних хвиль у металі.

При накладенні вібрацій ультразвукового діапазону можна спостерігати підвищення ефективності обробки при збільшенні вмісту вуглецю в сталевих матеріалах, але у випадку, коли його вміст менший за 0,4%, не вдається отримати достатнього подрібнення зерен. Крім того, ультразвукові генератори не здатні забезпечити велику амплітуду коливань, що вимагає їх встановлення безпосередньо в розплав. Це зумовлює складні умови експлуатації обладнання та скорочує термін його служби. До того ж така технологія є енергоємною та дорогавартісною.

Застосування низькочастотних вібрацій частотою 50 Гц та амплітудою 0,2 мм дає позитивні результати щодо підвищення інтенсивності тепловіддачі на 25-30%. Така обробка сприяє видаленню ліквіаційних, оксидних і газових дефектів із поверхні кристала, що забезпечує поверхневу однорідність сплаву [16]. Однак недоліком методу є однобічне підведення вібрацій до кристалізатора-охолоджувача. Це перешкоджає рівномірному покращенню структури за всім поперечним перерізом злитка, що кристалізується.

Одним із найскладніших завдань під час вібраційної обробки металевих розплавів є вибір місця накладення коливань. Дослідження [16] засвідчують, що кращі результати забезпечує вібраційний вплив на безперервнолитий матеріал у зоні вторинного охолодження. У такому випадку під час кристалізації злитка покращення мікроструктури сталевих виробів досягається завдяки скороченню зони стовпчастих кристалів і руйнуванню межі дендритів при їх дробленні. Це сприяє утворенню додаткових центрів кристалізації, усуненню ліквіації та загальному підвищенню якості заготовок.

Для максимального покращення якості мікроструктури матеріалу необхідно забезпечити можливість регулювання частоти вібраційних коливань у процесі твердіння. Це пов'язано з тим, що кристалізація металів і сплавів певного хімічного складу має індивідуальні особливості, на які безпосередньо впливає частота вібрацій. Невідповідність параметрів вібраційних коливань хімічному складу матеріалу унеможливує отримання металовиробу з необхідними фізико-механічними характеристиками.

Для удосконалення процесу виготовлення металовиробу за рахунок інтенсифікації тепловідведення під час кристалізації в машині безперервного лиття заготовок у роботі пропонується використовувати пневмомеханічний генератор [17, 18].

Мета статті

Полягає в удосконаленні технології виготовлення безперервнолитих заготовок із низьковуглецевої сталі шляхом застосування регульованого вібраційного впливу в зоні кристалізації. Дослідження спрямоване на підвищення експлуатаційних характеристик металовиробів і аналіз ефективності роботи пневмомеханічного обладнання для створення вібраційних коливань в машинах безперервної розливки.

Виклад основного матеріалу

Процес безперервної розливки сталі здійснювали за схемою, наведеною на рис. 1. Машина безперервної розливки складається з таких основних вузлів [1, 4]: розливного та проміжного ковшів, мідного кристалізатора-охолоджувача, тягнучих роликів і повітряно-крапельної системи охолодження.

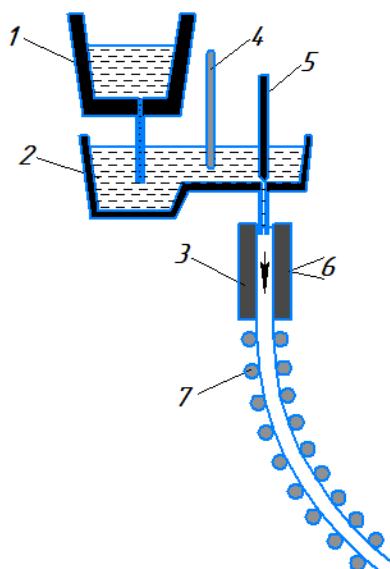


Рис. 1 – Схема машини безперервної розливки: 1 – розливний ківш; 2 – проміжний ківш; 3 – кристалізатор; 4 – нагрівний пристрій; 5 – стопор; 6 – зона первинного охолодження; 7 – тягнучі ролики

У процесі виготовлення сталевих виробів методом безперервної розливки рідку сталь, отриману в сталеплавильному агрегаті, подавали в розливний ківш. Останній встановлювали на стенд і переміщували до машини безперервної розливки, де фіксували над проміжним ковшем у робочому положенні. Проміжний ківш забезпечував підтримку постійного рівня рідкого металу. Після досягнення робочого рівня розплаву в проміжному ковші відкривалися випускні отвори, що мають стакани-дозатори, крізь які рідкий сплав безперервно надходив до кристалізатора. У ньому відбувалося інтенсивне охолодження металу разом із наданням заготовці заданого профілю та формуванням її зовнішнього шару. Після виходу на робочу швидкість розливки та стабілізації рівня розплаву в кристалізаторі-охолоджувачі подальше регулювання рівня металу здійснювалось автоматично за допомогою стопора проміжного ковша.

Для зменшення сил тертя між стінками кристалізатора-охолоджувача та матеріалом, що кристалізується, подавали рідке мастило, що запобігало «зависанню» заготовки та утворенню на ній тріщин.

На виході з кристалізатора температура зливка, що кристалізується, зменшувалася до 1000°C. Контроль температурного режиму процесу кристалізації забезпечували за допомогою пірометра Flus IR-870.

Заготовку, що мала рідку сердцевину й утворену тверду зовнішню кірку, витягали з кристалізатора-охолоджувача та спрямовували в зону вторинного охолодження, де матеріал заготовки остаточно тверднув за всім поперечним перерізом. Тепловідведення здійснювали охолоджувальним середовищем, що являло собою водоповітряну суміш. Температура кристалізації залежала від марки матеріалу, з якого виготовлявся виріб. Затверділа кірка, яка утворювалася в кристалізаторі-охолоджувачі, мала невелику товщину, що сприяло інтенсифікації відведення тепла від рідкої фази. Процес кристалізації відбувався зі швидкістю, що залежала від інтенсивності відведення теплоти охолоджувальним агентом [8, 9].

У дослідженнях використовувалася низьковуглецева сталь 20, хімічний склад якої наведено в табл. 1 [19].

З метою інтенсифікації процесу відведення тепла під час кристалізації металу та формування його однорідної мікроструктури в зоні вторинного охолодження було встановлено пневмомеханічний генератор. Він забезпечував створення вібраційних хвиль, спрямованих перпендикулярно до напрямку руху зливка, що виходив із машини безперервного лиття (рис. 2) [18, 19].

На рис. 2а показано горизонтальну проєкцію вібраційного приладу, а на рис. 2б і 2в наведено його перерізи А-А та Б-Б відповідно.

Таблиця 1

Хімічний склад низьковуглецевої Сталі 20 [18]

Fe	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cu	Cr
>98	0,17÷0,25	0,15÷0,35	0,30÷0,65	>0,3	>0,035	>0,03	>0,3	>0,3

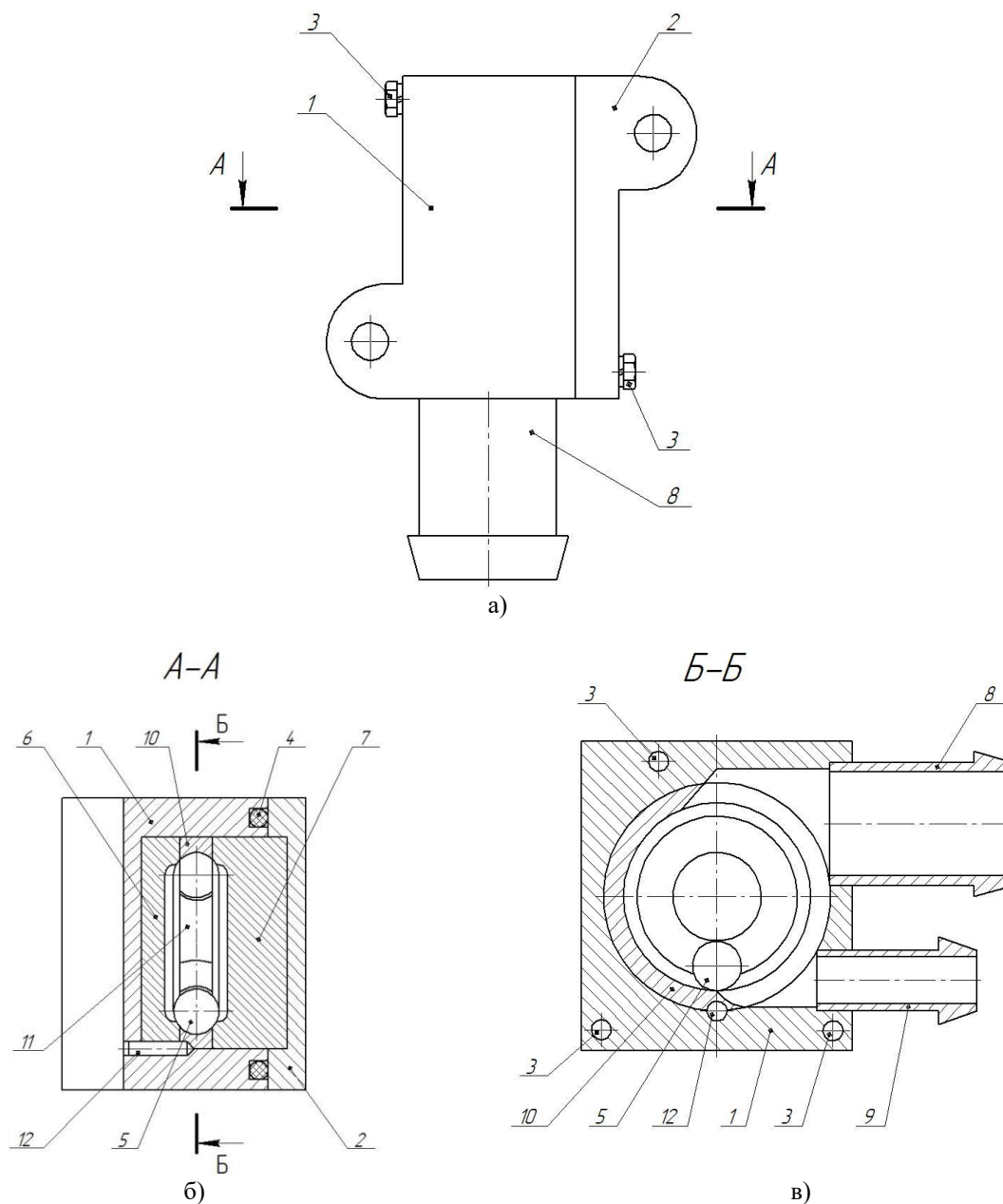


Рис. 2 – Пневмомеханічний генератор: а) горизонтальна проєкція; б) переріз А-А; в) переріз Б-Б; 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – болтове з'єднання; 4 – ущільнення; 5 – кулька; 6 – ліва вкладка; 7 – права вкладка; 8 – вихлопний ніпель; 9 – напірний ніпель; 10 – середня вкладка; 11 – бігова доріжка; 12 – штифт

У корпус пневмомеханічного генератора вставлено вкладки, які фіксуються за допомогою штифта. Кришка кріпиться до корпусу за допомогою болтового з'єднання. Для роботи устаткування на вхід через напірний ніпель подається стиснене повітря під тиском P_1 . Такі дії приводять у рух кульку, яка починає

переміщатися по біговій доріжці. Через вихлопний ніпель під тиском P_2 повітря виходить із корпусу. Виникає динамічний дисбаланс маси, що спричиняє пружні коливання корпусу генератора. Таким чином пристрій створює гармонійні коливання з визначеною частотою, яка дорівнює частоті обертання кульки. Ці коливання

передаються оброблюваному матеріалу в зоні вторинного охолодження. Зміна тиску повітря на вході в генератор дозволяє регулювати швидкість руху кульки і, відповідно, частоту коливань пристрою.

Такі генератори вирізняються компактними габаритами (20×20×10 мм) і виготовляються з жароміцної сталі, що забезпечує їхню стабільну роботу в умовах високих температур. Відстань встановлення генератора варіювалася в межах від 0,2 до 0,35 м від торця кристалізатора.

Генератор працював під дією стисненого повітря, що подавалося на вхід. Під час тривалої експлуатації обладнання могло нагріватися, що негативно впливало на результати обробки. Для запобігання перегріву та підтримання стабільного температурного режиму на пристрій подавали змащувально-охолоджувальний засіб.

Дослідження підтвердило, що регулювання тиску на вході в генератор дозволяло точно керувати частотою коливань для оптимізації процесу затвердіння. Це забезпечувало усунення усадочних раковин, мінімізацію ліквідаційних процесів і запобігало формуванню грубозернистої структури, що підвищувало цілісність і однорідність заготовок.

Робота генератора була безперервною та узгодженою з технологічним циклом машини безперервного лиття. Результати впливу тиску на вході в генератор на частоту його коливань при обробці низьковуглецевої сталі марки Сталь 20 наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження впливу зміни тиску на вході в генератор на частоту його коливань при обробці сталі марки Сталь 20 [19]

Тиск повітря на вході P_1 , Па	Тиск повітря на виході P_2 , Па	Частота коливань f , Гц
80	65	55
90	68	53
100	70	50
150	95	58
170	100	60
250	140	68
300	160	71
320	172	72
400	205	77
500	260	83

Дослідженнями встановлено, що залежність показників міцності металовиробів від частоти вібраційних коливань мала параболічний характер. Раціональним визначено діапазон частот 50–75 Гц, який забезпечував максимальний приріст механічних характеристик. Застосування частот нижче 50 Гц не давало суттєвого ефекту: межа міцності зростала лише з 410 до 420 МПа. Водночас перевищення порогу 75 Гц призводило до поступового зниження міцності через виникнення надмірних внутрішніх напружень стиснення, що

спричиняло появу тріщин на етапі затвердіння заготовки. Оптимізація вібраційного режиму в межах 50–75 Гц дозволяла досягти найкращих результатів, підвищуючи межу міцності сталі до 10%.

Застосування вібраційного впливу в зоні вторинного охолодження машини безперервної розливки сталі забезпечувало сприятливі умови для затвердіння металу та дозволяло отримувати заготовки підвищеної якості. Крім того, генерування вібраційних хвиль у такий спосіб характеризувалося низькою енергомісткістю порівняно з іншими методами зовнішнього впливу.

Оптимальною визначено температуру зливка на виході з кристалізатора в межах 1100–1150°C. Такий температурний режим дозволяв сформувати металовиріб, який мав тверду зовнішню кірку та в'язку серцевину. За вищої температури утворена кристалічна оболонка була недостатньо міцною для утримання всередині внутрішньої фази. Натомість зниження температури (менше ніж 1100°C) призводило до інтенсивного зростання неоднорідних стовпчастих кристалів, що зумовлювало формування пористої та неякісної структури металовиробів.

Доцільним визнано встановлення генератора на відстані 0,3–0,35 м від торця кристалізатора. За меншої відстані (менше ніж 0,3 м) утворена зовнішня кірка була занадто тонкою та слабкою, що призводило до її руйнування під дією вібраційних навантажень. У випадку збільшення відстані встановлення генератора понад 0,35 м безперервнолитий зливок уже мав повністю сформовану кристалічну мікроструктуру за всім поперечним перерізом, що унеможливило ефективне коригування будови металу шляхом вібраційного впливу.

Висновки

На підставі проведених досліджень удосконалено технологію виробництва безперервнолитих заготовок із низьковуглецевої сталі марки Сталь 20 шляхом застосування регульованого зовнішнього впливу на металевий розплав під час його затвердіння. Це забезпечило інтенсифікацію теплообмінних процесів у зоні кристалізації матеріалу та підвищення якості металовиробу завдяки досягненню високої щільності й однорідності матеріалу, що дозволило покращити його механічні характеристики. Такий вплив реалізовано за допомогою пневмомеханічного генератора, який забезпечував надійну вібраційну обробку матеріалу в процесі його затвердіння. Генерація вібраційних хвиль цим пристроєм і регулювання їхньої частоти потребує мінімальних енергетичних витрат порівняно з іншими типами генераторів.

Для забезпечення оптимальних умов кристалізації матеріалу пневмомеханічний пристрій було розташовано в зоні вторинного охолодження машини безперервного лиття заготовок на відстані 0,3–0,35 м від торця кристалізатора. Найкращі результати були

отримані при обробці металовиробів зі сталі 20 вібраційними коливаннями частотою 50–75 Гц, що забезпечувало приріст їх механічних властивостей до 10%.

У подальшому планується продовжити дослідження в умовах суміщення процесів лиття-прокатування для виготовлення широкого асортименту металовиробів.

Перелік використаних джерел

- [1] Смірнов О.М., Тімошенко С.М., Нарівський А.В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісник Національної академії наук України*. 2023. № 4. С. 21-38. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2023.04.021>.
- [2] Макуров С. Л., Ефременко Б. В. Метод исследования процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 30. Т.1. С. 74–80.
- [3] Воденнікова О. С., Воденнікова Л. В. Сучасний стан та проблеми безперервної розливки сталі в Україні. *Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості*: матеріали XXII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА, м. Запоріжжя, 23-27 жовтня 2017 р. Запоріжжя: ЗДІА, 2017. Том 1. С. 11.
- [4] Проектування ливарно-прокатних цехів: навч. посіб. / В. А. Чубенко та ін. Кривий Ріг: КНУ, 2025. 318 с.
- [5] Сталь України: відновлення та інновації: монографія / Смірнов О.М та ін. Київ: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2023. 268 с.
- [6] Деякі особливості розливання сортової заготовки відкритим та закритим струменем / О. М. Смірнов та ін. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 2, № 31. С. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.034>.
- [7] Могилатенко В. Г. Візуалізація твердіння лиття під впливом вібрації. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 4. С. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.05>.
- [8] Вплив технологічних параметрів розливання і кристалізації сталі на якісні показники безперервно-ливої заготовки / Е. В. Парусов та ін. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2016. № 2. С. 8-16.
- [9] Вплив вібрації на формування безперервно-ливої блюмінгової заготовки / Нурадінов А. С., Ельдарханов А. С., Ноговіцин О. В., Таранов Є. Д. *Металознавство та обробка металів*. Київ, 2013. Вип. 3. С. 15-23.
- [10] Матеріалознавство: навчальний посібник / Бузило В. І., Сердюк В. П., Яворський А. В., Гайдай О. А. Дніпро: НТУ ДП, 2021. 243 с.
- [11] Дослідження впливу внутрішнього діаметра та глибини розташування зануреного стакану у кристалізаторі радіальної сортової МБЛЗ 15 / О. П. Верзілов та ін. *Процеси лиття*. 2020. Вип 140, № 2. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.02.015>.
- [12] Research Thermal Fields in the Crystallization Process of Steel Cast Parts / R. Liutiy et al. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Article 7331866. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/7331866>.
- [13] Liao Q., Ge P., Lu G. Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on ProCAST. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 3. Pp. 3-13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4484762>.
- [14] Micro-macro modeling of thermal evolution during solidification of binary equiaxed alloys with experimental verification / Egole K. P., Mgbemere G. E., Sobamowo G. M., Laval G. I. *Results in Engineering*. 2022. № 14. Article 100444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100444>.
- [15] Зубко А. А., Койфман О. О. Застосування математичної моделі теплообміну для управління охолодженням злитку у кристалізаторі МБРЗ. *Наука та виробництво*. 2020. Вип. 23. С. 338-396. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241215>.
- [16] Numerical simulation of temperature and fluid fields in the solidification process of ferritic stainless steel under vibration conditions / W. Wang et al. *Crystals*. 2019. № 9(3). Article 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst9030174>.
- [17] Спосіб виробництва безперервно-ливої заготовки: пат. 55153 Україна: МПК B22BD 11/00. № u201005520; заявл. 18.09.2009; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 23.
- [18] Спосіб поліпшення мікроструктури безперервно-литих заготовок під час кристалізації низьковуглецевої сталі: пат. 156218 Україна: МПК B22B 11/00. № u202306102; заявл. 14.12.2023; опубл. 22.05.2024, Бюл. № 21.
- [19] Пристрій для поліпшення мікроструктури безперервно литих заготовок: пат. 160943 Україна: МПК (2025.01) B22D 11/00. № u202501554; заявл. 08.04.2025; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 43. 6 с.

IMPROVEMENT OF THE PRODUCTION PROCESS OF METAL PRODUCTS IN CONTINUOUS CASTING MACHINES

- Chubenko V.A.** PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-0285>, e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua;
- Yarosh T.P.** PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-9630>, e-mail: yarosh_tp@knu.edu.ua;
- Khinotska A.A.** senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-0583>, e-mail: khinotska_aa@knu.edu.ua

The article suggests a method for improving the microstructure of a continuously cast product by means of the application of controlled vibrational impact during solidification. The relevance of this study is driven by the increasing demand for structural materials with high strength, durability, and operational reliability - properties that are entirely determined by the internal structure of the metal product. The objective of this research is to improve the structural integrity and microstructural characteristics of continuously cast billet by applying a regulated external impact on the formation of the product's internal structure. To achieve this aim, the following tasks shall be pursued: to verify a method for improving the microstructure of a continuously cast low-carbon steel billet by introducing vibrational oscillations of a rational frequency into the solidification zone; to research the operation of a pneumomechanical generator that ensures a stable vibrational impact of a specified frequency on the structure formation process in a continuous casting machine. The study implements the improvement of the internal structure of the product through the application of controlled vibrational impact on solidification processes and develops a design of equipment for its practical implementation. To generate controlled vibrations directly during steel casting, pneumomechanical generators are proposed, which allow the oscillation frequency to be varied depending on the specific solidification conditions and the grade of the metal or alloy. Control of the frequency characteristics is achieved by varying the compressed air pressure at the generator inlet. It has been established that, for producing high-quality metal products from low-carbon steel grade St20, the rational frequency range lies between 50 and 75 Hz. The device is recommended to be installed at a distance of 0.3–0.35 m from continuous casting mold outlet. The proposed method ensures favorable conditions for metal formation and enables the production of high-quality billets. The scientific novelty of the work lies in the theoretical and experimental substantiation of a method for regulating the generator oscillation frequency by varying the air pressure. The equipment used to generate vibrational waves is characterized by structural simplicity and operational reliability. It can be easily integrated into existing continuous billet casting lines at steelmaking plants.

Keywords: solidification; vibrational impact; pneumomechanical generator; controlled oscillation frequency; secondary cooling zone.

References

- [1] O. M. Smirnov, S. M. Timoshenko, and A. V. Narivskiy, "Vidnovlennia ta innovatsiyni rozvytok vyrobnytstva stali v Ukraini v konteksti enerhoefektyvnosti ta yevropeiskoho zelenoho kursu" ["Renovation and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and Green Deal"], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, № 4, pp. 21-38, 2023. doi: 10.15407/vsn2023.04.021.
- [2] S. L. Makurov, B. V. Efremenko, "Metod yssledovaniya protsessa zatverdevaniya neprerivnolytoi zahotovky v krystallyzatore MNLZ" ["The method for research of solidification process of continuous casting blanks in the mold of CCM"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, № 30, vol. 1, pp. 74–80, 2015. (Rus.)
- [3] O. S. Vodennikova, and L. V. Vodennikova, "Suchasnyi stan ta problemy bezperervnoi rozlyvky stali v Ukraini" ["Current status and problems of continuous steel casting in Ukraine"], in *Proc. of the XXII Sci.-Techn. Conf. of students, undergraduates, post-graduates and lectureks of ZSIA «Metallurgy and energy conservation as the basis of modern industry»*, Zaporizhzhia, Oct. 23-27, 2017, vol. 1, pp. 1. (Ukr.)
- [4] V. A. Chubenko, L. N. Saithareiev, T. P. Yarosh, I. E. Skidin, and A. A. Khinotska, *Proiektuvannia lyvarno-prokatnykh tsekhiv: navch. posib.* [Design of foundry and rolling mills: a training manual]. Kryvyi Rih, Ukraine: KNU Publ., 2025. (Ukr.)
- [5] O. M. Smirnov, S. M. Timoshenko, A. V. Narivskiy, S. V. Semirahin, V. V. Osypenko, and Yu. P. Skorobahatko, *Stal Ukrainy: vidnovlennia ta innovatsii: monohrafiia* [Steel of Ukraine: Restoration and Innovation: Monograph]. Kyiv, Ukraine: Scientific and Technological Enterprise «Publishing House «Scientific Thought» of the NAS of Ukraine», 2023. (Ukr.)
- [6] O. M. Smirnov et al., "Deiaki osoblyvosti rozlyvannia sortovoi zahotovky vidkrytym ta zakrytym strumenem" ["Some specifics of the billet open and

- submerged stream casting”], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 2, № 31, pp. 34–41, 2023. doi: [10.15407/steelcast2023.02.034](https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.034). (Ukr.)
- [7] V. G. Mogylatenko, “Vizualizatsiia tverdinnia lyttia pid vplyvom vibratsii” [“Visualization solidification casting under the influence of vibration”], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, № 4, pp. 31–37, 2019. doi: [10.34185/tpm.4.2019.05](https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.05). (Ukr.)
- [8] E. V. Parusov, O. B. Sychkov, I. M. Chuiko, L. V. Sahura, A. I. Sivak, “Vplyv tekhnologichnykh parametrov rozlyvannia i krystalizatsii stali na yakisni pokaznyky bezperervnolytoi zahotovky” [“The influence of technological parameters of steel casting and crystallization on the quality indicators of continuously cast billets”], *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, № 2, pp. 8–16, 2016. (Ukr.)
- [9] A. S. Nuradinov, A. S. Eldarkhanov, O. V. Nohovitsyn, and Ye. D. Taranov, “Vplyv vibratsii na formuvannia bezperervnolytoi bluminhovoii zahotovky” [“The influence of vibration on the formation of continuous-flow blanks”], *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metal Science and Treatment of Metals*, vol. 3, pp. 15–23, 2013. (Ukr.)
- [10] V. I. Buzlylo, V. P. Serdiuk, A. V. Yavorskyi, and O. A. Haidai, *Materialoznavstvo: navchalnyi posibnyk* [Materials Science: A Study Guide]. Dnipro, Ukraine: NTU DP Publ., 2021. (Ukr.)
- [11] O. P. Verzilov, A. Yu. Semenko, Yu. Yu. Kulish, L. I. Hoida, H. R. Verzilova, and D. S. Vasyliiev, “Doslidzhennia vplyvu vnutrishnoho diametra ta hlybyny roztashuvannia zanurenogo stakana u krystalizatori radialnoi sortovoii MBLZ 15” [“Investigation of the Influence of the Inner Diameter and the Depth of Placement of the Sen in the Mold of Radial Billet CCM”], *Protsesi lyttia – Casting processes*, vol. 140, № 2, pp. 15–21, 2020. doi: [10.15407/plit2020.02.015](https://doi.org/10.15407/plit2020.02.015). (Ukr.)
- [12] R. Liutyi, I. Petryk, V. Mogylatenko, V. Popovych, and H. Shatska, “Research Thermal Fields in the Crystallization Process of Steel Cast Parts,” *Advances in Materials Science and Engineering*, article 7331866, 2022. doi: [10.1155/2022/7331866](https://doi.org/10.1155/2022/7331866).
- [13] Q. Liao, P. Ge, and G. Lu, “Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on ProCAST,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 3, pp. 3–13, 2022. doi: [10.1155/2022/4484762](https://doi.org/10.1155/2022/4484762).
- [14] K. P. Egoie, G. E. Mgbemere, G. M. Sobamovo, and G. I. Laval, “Micro-macro modeling of thermal evolution during solidification of binary equiaxed alloys with experimental verification,” *Results in Engineering*, № 14, article 100444, 2022. doi: [10.1016/j.rineng.2022.100444](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100444).
- [15] O. Koyfman, and A. Zubko, “Zastosuvannia matematychnoi modeli teploobminu dlia upravlinnia okholodzhenniam zlytku u krystalizatori MBRZ” [“Application of mathematical model of heat exchange for controlling the cooling of the ingot in the continuous-casting mold”], *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, vol. 23, pp. 338–396, 2020. doi: [10.31498/2522-9990232020241215](https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241215). (Ukr.)
- [16] W. Wang, J. Chen, M. Li, A. Wang, and M. Su, “Numerical simulation of temperature and fluid fields in the solidification process of ferritic stainless steel under vibration conditions,” *Crystals*, № 9(3), article 174, 2019. doi: [10.3390/cryst9030174](https://doi.org/10.3390/cryst9030174).
- [17] I. D. Buha, “Sposib vyrobnytstva bezperervnolytoi zahotovky” [“Method of producing a continuously cast billet”], UA Patent 55153 Appl. u201005520, February 10, 2010. (Ukr.)
- [18] V. A. Chubenko, T. P. Yarosh, L. N. Saithareiev, I. E. Skidin, and A. A. Khinotska, “Sposib polipshennia mikrostruktury bezperervnolytykh zahotovok pid chas krystalizatsii nyzkovuhletsevoi stali” [“Method for improving the microstructure of continuously cast billets during crystallization of low-carbon steel”], UA Patent 156218 Appl. u202306102, May 02, 2024. (Ukr.)
- [19] V. A. Chubenko, A. A. Khinotska, and T. P. Yarosh, “Prystrii dlia polipshennia mikrostruktury bezperervno lytykh zahotovok” [“Device for improving the microstructure of continuously cast billets”], UA Patent 160943 Appl. u202501554, Oct. 22, 2025. (Ukr.)

Стаття надійшла 22.02.2026

Стаття прийнята 10.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Чубенко В. А., Ярош Т. П., Хіноцька А. А. Удосконалення процесу виготовлення металевих виробів у машинах безперервного лиття заготовок. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 222–229. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359811>.

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛИТИХ КОЛОСНИКІВ ЯК ФАКТОР ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КОНВЕЄРНИХ АГРЕГАТАХ ТЕРМОЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНОЇ СИРОВИНИ

Панченко Г.М.

канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7565-0380>, e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua;

Іванов А.С.

заступник начальника фабрики огрудування з інжинірингу, ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат», м. Кривий Ріг, e-mail: andrey.ivanov@metinvestholding.com

У роботі проведено аналіз конструкцій литих колосників, що використовуються в агрегатах термозміцнення металургійної сировини. Необхідність дослідження зумовлена дією екстремальних циклічних термічних навантажень (400–1000°C) та потребою в збільшенні міжремонтного періоду обпалювальних конвеєрних машин і стабілізації виробничих циклів. Метою роботи є систематизація факторів, що впливають на експлуатаційну надійність колосників, та інженерне обґрунтування шляхів збільшення терміну їх служби. На основі порівняльного аналізу колосників, що експлуатуються на машинах типу Lurgi-552 (ПрАТ ПівнГЗК) та ОК-324 (ПрАТ ЦГЗК), встановлено вплив конструктивних особливостей на характер їх зношування. Особливу увагу приділено аеродинамічній стабільності колосникового поля. Встановлено, що застосування жорсткої пазової системи фіксації (характерної для конструкції колосників на машинах ОК-324) усуває «ефект накопичення похибок збірки», притаманний безпазовим аналогам, що використовуються на машинах Lurgi-552 при ручному монтажі. Розрахований коефіцієнт монтажно-ї щільності для пазової конструкції становить 0,976, тоді як для безпазових аналогів – 0,930. Наукова новизна дослідження полягає у встановленні взаємозв'язку між конструктивною жорсткістю колосників і розподілом термічних напружень. Розрахунки довели, що пазова конструкція колосників забезпечує на 12,7% більшу площу «живого перерізу» (0,5410 м² проти 0,4799 м²), що знижує швидкість фільтрації теплоносія, мінімізує абразивне зношування та втрати пилу. Крім того, теоретичний аеродинамічний опір такого колосникового поля на 27,2% нижчий, що забезпечує істотне зменшення енергоспоживання тяго-дутьових систем. Практичне значення роботи полягає в наданні рекомендацій щодо впровадження ефективних конструкцій колосників, які дозволяють підвищити їх експлуатаційний ресурс у 1,5–1,7 рази без зміни технологічного циклу. Запропоновані рішення забезпечують рівномірність термічної обробки окатишів завдяки усуненню «холодних зон» на площі палети.

Ключові слова: литі колосники; термозміцнення сировини; експлуатаційна довговічність; металургійне обладнання; параметри технологічного процесу; конструктивна оптимізація; термічна деградація; зносостійкість; ресурсозаощадження.

Постановка проблеми

Фундаментом ефективного функціонування сучасних агломераційних та обпалювальних машин конвеєрного типу є стан їх вантажонесучого полотна, що формується шляхом монтажу на рамах спікальних візків-палет декількох рядів колосників. Від конструктивного виконання колосникових ґрат безпосередньо залежать показники газопроникності шихтового шару, рівномірність розподілу теплових потоків та, як наслідок, якість кінцевого металургійного продукту – агломерату або окатишів.

На сьогодні перед вітчизняними підприємствами металургійної галузі постає гостра проблема підвищення енергоефективності конвеєрних агрегатів при одночасному зниженні металоємності обладнання. Традиційні зварні та суцільнолиті конструкції колосників часто не забезпечують оптимального балансу між стійкістю до критичних температур (понад 1000°C) та аеродинамічними характеристиками. Передчасний вихід з ладу елементів ґрат призводить до неконтрольованого просипу матеріалу, порушенню технологічного процесу обпалення та зниження продуктивності машини.

Попри значну еволюцію конструкцій – від простих пластинчастих елементів до складних S-подібних та хвилеподібних профілів, що використовують ефекти «теплого насоса» та лабіринтної герметизації – питання вибору раціональної геометрії залишається дискусійним. Необхідність мінімізації металоємності колосників при збереженні їхнього міжремонтного ресурсу та забезпечення стабільного теплообміну в умовах високотемпературного середовища вимагає глибокого аналізу конструкційних особливостей та їхнього впливу на експлуатаційні показники агрегатів.

Таким чином, комплексний аналіз конструкційних особливостей литих сталевих колосників є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на пошук балансу між ресурсозаощадженням, надійністю та інтенсифікацією технологічних процесів у металургійному виробництві.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблема вдосконалення конструктивних параметрів колосникових полів конвеєрних машин залишається пріоритетним напрямком досліджень через безпосередній вплив стану ґрат на термодинаміку

процесів спікання та обпалювання. Сучасний етап розвитку наукової думки у цій галузі характеризується переходом від простого опису конструкцій до комплексного аналізу взаємозв'язку між геометрією виливка, характером теплових потоків та механізмами деградації матеріалу в екстремальних умовах експлуатації.

Одним із ключових шляхів підвищення ефективності агрегатів є інтенсифікація теплообміну через оптимізацію активного перетину колосників. Встановлено, що застосування елементів зі змінним профілем та збільшеним кутом контактних граней сприяє зниженню термічного навантаження на металоконструкції палет. Такий ефект досягається завдяки покращенню аеродинамічних характеристик ґрат та інтенсифікації конвективного охолодження робочих поверхонь потоками газу [1, 2].

Важливим аспектом тривалої працездатності обладнання є забезпечення стабільної газопроникності шару. Доведено, що конструктивне виконання колосників повинно мінімізувати просип дрібних фракцій шихти, водночас реалізуючи механізм самоочищення зазорів. Рациональне використання площі опорних вузлів та впровадження дистанційних приливів дозволяє підтримувати стабільний «живий переріз» протягом усього міжремонтного циклу, що є критичним фактором для забезпечення рівномірності термозміцнення сировини [3].

Особлива увага в науковій літературі приділяється фундаментальному аналізу причин передчасного виходу деталей з ладу. На основі металографічних та мікроструктурних досліджень ідентифіковано, що основними чинниками деградації високолегованих сталей (зокрема системи Cr-Ni) є циклічні температурні коливання, які спричиняють пластичну деформацію, термічну втому та утворення глибоких тріщин [4]. Хімічна стабільність матеріалу не завжди є гарантією довговічності, оскільки експлуатаційні фактори призводять до виділення крихких фаз та карбідної сітки по межах зерен, що знижує в'язкість сталі. Це обумовлює необхідність такого профілювання робочих поверхонь, яке б забезпечувало мінімізацію концентраторів напружень та рівномірний розподіл температурного поля [5].

Перспективним інструментом прогнозування поведінки колосникових ґрат є чисельне моделювання тепломасообмінних процесів. Результати CFD-аналізу підтверджують, що конфігурація робочої зони колосника є визначальним параметром для керування швидкістю переміщення фронту горіння. Використання методів математичного моделювання дозволяє науково обґрунтувати можливість зниження металоємності виливка без втрати його жорсткості та теплофізичної ефективності [6, 7].

Таким чином, незважаючи на наявність значного масиву даних щодо матеріалознавчих та конструктивних аспектів, питання пошуку оптимальної геометрії литих колосників, яка б гармонізувала вимоги ресурсозаощадження та експлуатаційної надійності,

залишається відкритим, що і визначає актуальність даного дослідження.

Мета статті

Метою роботи є виявлення та систематизація ключових факторів, що визначають експлуатаційну довговічність литих колосників в умовах термозміцнення металургійної сировини, а також обґрунтування шляхів підвищення ресурсу роботи обладнання. У межах реалізації цієї мети здійснюється порівняльний аналіз виробничого досвіду експлуатації різних конструкцій колосників, що дозволяє визначити вплив конструктивно-технологічних особливостей виробів на характер зносу та інтенсивність деградації металу.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є конструкція колосникового поля конвеєрних машин термозміцнення металургійної сировини. Предметом дослідження виступає вплив геометричних параметрів колосників на розподіл термічних напружень та аеродинамічну ефективність газопроникної системи агрегату.

Для обґрунтування технічних рішень застосовано комплексний підхід, що базується на фундаментальних положеннях теплофізики та механіки деформівного твердого тіла.

Оцінку термічного стану колосників виконано на основі рівняння теплопровідності Фур'є для стаціонарних процесів.

Аналіз конструктивної жорсткості колосників проводився з використанням положень теорії опору матеріалів. Геометричні чинники, що зумовлюють утворення зон підвищеної напруженості, визначалися шляхом креслярсько-конструкторського аналізу профілів колосників. Вплив пазової системи фіксації на перерозподіл зусиль, спричинених термічним розширенням елементів конструкції, оцінювався відповідно до закону Гука.

Оцінку опору газового потоку при проходженні через колосникове поле виконано на основі рівняння Дарсі-Вейсбаха. Це дало можливість встановити залежність між конструктивною щільністю монтажу колосників, площею «живого перерізу» колосникового поля та енергоспоживанням тяго-дутьових систем агрегату.

Проведено порівняльний аналіз конструкцій колосників, що експлуатуються на конвеєрних машинах типу Lurgi-552 (ПрАТ «ПівніЗК») та ОК-324 (ПрАТ «ЦЗК»). Основою дослідження стали виробничі дані щодо напрацювання колосників до заміни. Це дозволило оцінити вплив конструктивної жорсткості та так званого «ефекту накопичення похибок збірки» на інтенсивність абразивного зношування робочих поверхонь.

Виклад основного матеріалу

Розвиток конструкцій колосників відбувався шляхом пошуку балансу між двома протилежними чинниками: забезпеченням максимального «живого перетину» для проходження газів та збереження механічної міцності при високих термічних навантаженнях [8-10]. Аналіз існуючих рішень дозволяє виділити декілька ключових напрямків модернізації.

1. Оптимізація геометрії робочої частини для підвищення газопроникності.

Одним із базових підходів є зміна профілю середньої частини колосника. Характерним прикладом є конструкція, наведена на рис. 1, де робоча частина має трапецеїдальну форму з чітко визначеним співвідношенням радіусів кривизни.

Експериментально встановлено, що дотримання відношення зовнішнього радіуса до внутрішнього в межах 1,08–1,22 при товщині перетину 20–60 мм дозволяє не лише стабілізувати шар шихти, а й мінімізувати термічні напруження, що виникають при циклічному нагріві.

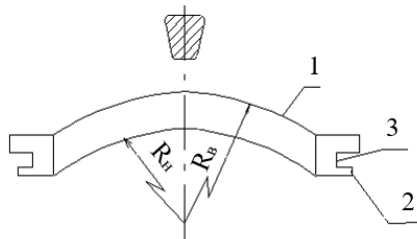


Рис. 1 – Конструкція колосника з трапецеїдальною формою робочої частини: 1 – робоча частина; 2 – головка колосника; 3 – зів для кріплення колосника; R_v – радіус постійної кривизни верхньої поверхні; R_n – радіус постійної кривизни нижньої поверхні

2. Конструкції з посиленими вузлами фіксації та самоочищення.

Наступним етапом еволюції стали колосники з модернізованими головками та опорними елементами. У конструкції на рис. 2 головна увага приділена зіву для кріплення.

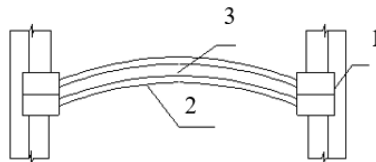


Рис. 2 – Колосник, з посиленими вузлами фіксації: 1 – бічні опори; 2 – подовжні ребра; 3 – зазор

Наявність виступів на торцях головки (рис. 3) виконує подвійну функцію:

– забезпечує стабільний технологічний зазор між суміжними деталями;

– створює ефект самоочищення колосникового поля під час вібраційного впливу при русі палет [8].

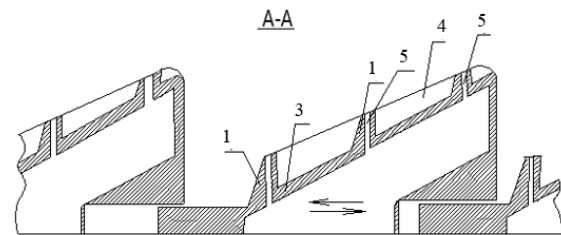
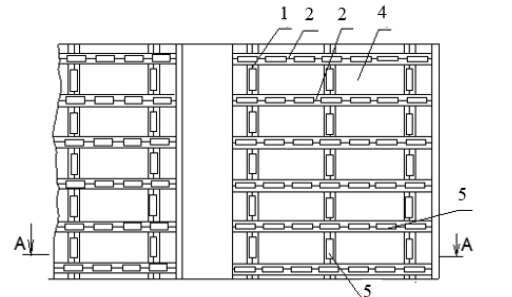


Рис. 3 – Колосникові грати, зібрані з плитчастих колосників: 1 – система поперечних ребер; 2 – система подовжніх ребер; 3 – робоча поверхня; 4 – відсіки; 5 – щілиновидні отвори

3. Спеціалізовані рішення для зон інтенсивного термомеханічного зносу.

Для машин, що працюють в умовах підвищеного абразивного впливу, було розроблено колосники з потовщеними приливами у верхній частині (рис. 4).

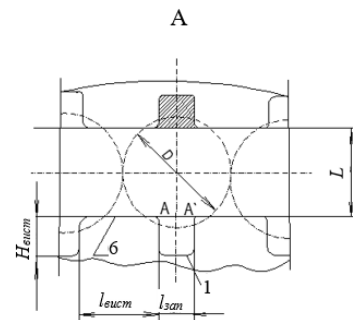
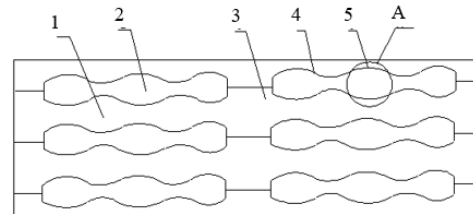


Рис. 4 – Колосникові грати і ділянка корпусу колосника з детальним потоншенням западин і виступів: 1 – колосник обпальовального візка; 2 – зазор; 3 – дистанційні бобишки; 4 – бічні поверхні; 5 – корпус колосника; 6 – виступи; 7 – западини; L – ширина існуючого зазору між колосниками; $H_{\text{вист}}$ – висота виступів на бічних поверхнях; $l_{\text{вист}}$ – ширина виступів; $l_{\text{зап}}$ – ширина западин

Така конфігурація дозволяє компенсувати втрату металу внаслідок мікрорізання торцевих стінок, тим самим подовжуючи міжремонтний період експлуатації машини.

4. Профілювання поперечного перерізу для інтенсифікації тепловідводу від робочої зони.

Однією з основних причин втрати роботоздатності колосників є їх обгорання, що призводить до неконтрольованої зміни форми та розмірів деталей. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано конструкцію, що базується на раціональному перерозподілі маси металу по перетину колосника (рис. 5–8).

Загальна компоновка виробу (рис. 5) передбачає наявність верхніх (1) та нижніх (2) опорних рожків, які забезпечують стабільну фіксацію основного тіла (3) на пальцевих балках спікального візка. Проте ключова науково-технічна новизна даної розробки зосереджена у специфічній формі робочої частини колосника (рис. 6). На відміну від традиційних конструкцій, тут застосовано вогнутий профіль бокових стінок (5) та суттєве розширення основи (6) основного тіла.

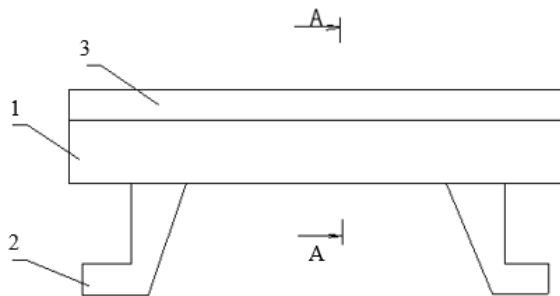


Рис. 5 – Загальний вигляд колосника з посиленою основою (вигляд збоку): 1 – верхній опорний рожок; 2 – нижній опорний рожок (елементи замкового кріплення); 3 – основне робоче тіло

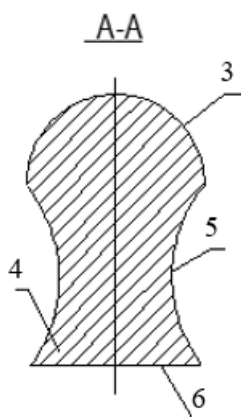


Рис. 6 – Поперечний розріз колосника з посиленою основою: 3 – робоча головка (напівсферична); 4 – масивна нижня частина (тепловий акумулятор); 5 – вогнуті бокові стінки; 6 – розширена основа

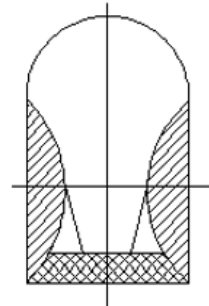


Рис. 7 – Графічна схема перерозподілу маси металу по перетину

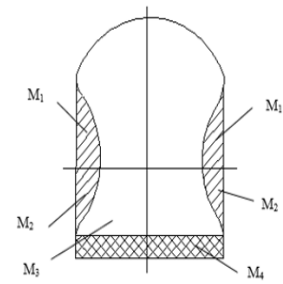


Рис. 8 – Розрахункова модель визначення геометричних параметрів колосника

Фізична сутність запропонованого профілювання полягає у створенні ефекту «теплового насоса». Масивна нижня частина (4) виконує функцію акумулятора тепла (холодильника), куди за рахунок високої теплопровідності матеріалу відводиться надлишкове теплове навантаження від робочої головки (2), що безпосередньо контактує з розпеченим шаром агломерату. Така інтенсифікація внутрішнього теплообміну дозволяє стабілізувати температуру робочої поверхні нижче критичних значень газової корозії.

Механізм формування такої структури базується на принципі раціонального перерозподілу металу, що наочно ілюструє схема порівняння з базовим колосником (рис. 7). Шляхом перенесення об'ємів маси (M_1 , M_2) з бокових граней у нижню частину (M_4) досягається приріст масивності теплопровідного вузла без збільшення загальної металоемності виробу (рис. 8).

Теоретичне обґрунтування параметрів моделі (рис. 8) дозволило встановити математичну залежність між геометричними характеристиками перерізу. Експериментально доведено, що оптимальне відношення мінімальної ширини колосника до його ширини в місці спряження має знаходитися в межах 0,33–0,75, а збільшення абсолютної ширини основи до 40–60 мм забезпечує найбільш сприятливий градієнт температур. Впровадження даного профілю дозволяє знизити інтенсивність обгорання деталей та підвищити їхній експлуатаційний ресурс у 1,5–1,7 раза порівняно з серійними зразками.

5. Лабіринтні та криволінійні форми торцевих поверхонь.

Одним із найбільш ефективних методів підвищення ККД процесів термозміцнення металургійної сировини є застосування колосників із нелінійною геометрією торцевих поверхонь, що дозволяє мінімізувати паразитні підсоси повітря. Характерним прикладом реалізації принципу взаємопов'язаних профілів є конструкція, представлена на рис. 9 та 10.

Колосник складається з робочої частини (1) та головки (2) із зівом (3) для встановлення на балку. Ключовою особливістю рішення є те, що опорна частина головки виконана зі спеціальним виступом (4) та пазом (5). Геометричні параметри цих елементів чітко

регламентовані: їхня довжина становить 0,5–1,0, а ширина та висота – 0,3–0,6 від відповідних розмірів опорної частини головки.

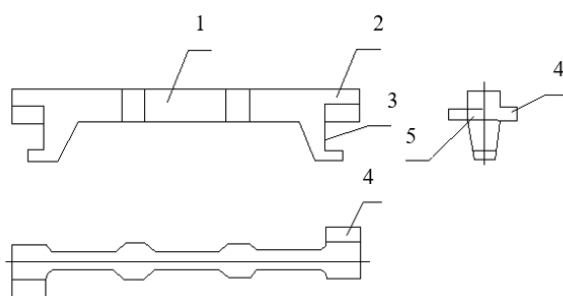


Рис. 9 – Колосник криволінійною формою торцевих поверхонь (три проекції): 1 – робоча частина; 2 – головка; 3 – зів; 4 – виступ; 5 – паз

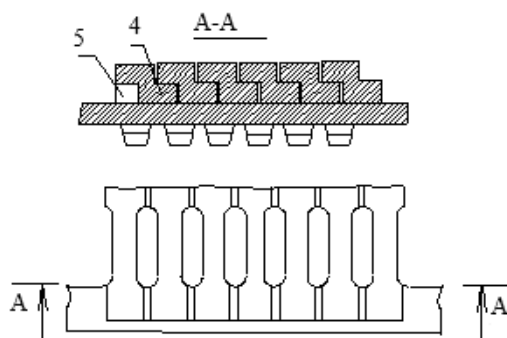


Рис. 10 – Частина колосникових ґрат з розрізом по А-А: 4 – виступ; 5 – паз

Така конфігурація реалізує концепцію лабіринтного ущільнення та механічної взаємоблокації. При складанні колосникового поля виступ (4) одного колосника входить у паз (5) суміжного (рис. 10). Це виконує дві критичні функції:

- аеродинамічна стабілізація: викривлення лінії стику створює додатковий опір для потоків газу в місцях контакту. Це перешкоджає прориву теплоносія повз шар шихти, спрямовуючи його безпосередньо в зону реакції;

- запобігання аварійним ситуаціям: наявність системи «виступ-паз» запобігає випаданню частин колосника у разі його випадкової поломки під час експлуатації. Сусідні деталі утримують пошкоджений фрагмент у ґратах, запобігаючи його потраплянню в тягнуттєві механізми.

Таким чином, впровадження лабіринтних форм дозволяє одночасно підвищити газодинамічну ефективність агрегату та експлуатаційну надійність решітчастого полотна в умовах інтенсивного термічного зносу.

6. Конструкційні заходи щодо підвищення надійності фіксації та запобігання вібраційному зносу.

Важливою науково-технічною проблемою при експлуатації набірних колосникових полів є самовільне переміщення деталей вздовж несучих балок палет під дією знакозмінних термічних навантажень та вібрацій. Для нівелювання цього явища та стабілізації газодинамічного опору шару розроблено систему кріплення зі зміщеними дистанційними елементами (рис. 11, 12) [10].

Конструкція колосника (рис. 11) включає основне тіло (1) та опорні рожки (2), що утворюють посилений зів для охоплення балки палети. Ключовою особливістю є наявність дистанційних планок (3), які розташовані на бокових поверхнях основного тіла зі зміщенням відносно вертикальної осі симетрії. Така конфігурація дозволяє при наборі колосників у касету створювати жорстке зчеплення між суміжними деталями.

Як видно з рис. 12, при формуванні колосникового поля дистанційні планки одного колосника впираються у планки або тіло сусіднього, що гарантує збереження заданого технологічного зазору ΔZ по всій площі палети. Це не лише стабілізує положення кожної окремої деталі, а й суттєво знижує контактні напруження в зоні підвісу, запобігаючи передчасному руйнуванню голівок колосників внаслідок втомних тріщин та вібраційного стирання. Впровадження зміщених планок дозволяє створити самоцентровану систему, яка зберігає свою геометрію навіть при значних термічних деформаціях несучих металоконструкцій.

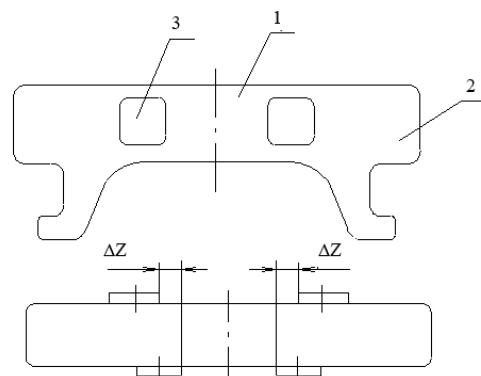


Рис. 11 – Колосник зі зміщеними дистанційними планками: 1 – основне тіло колосника; 2 – опорні рижки; 3 – дистанційна планка

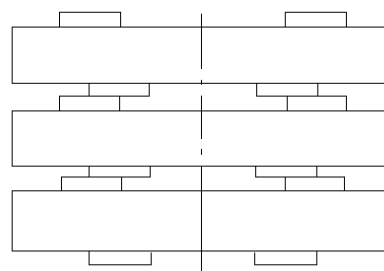


Рис. 12 – Колосникове поле з колосників зі зміщеними дистанційними планками

Окрему увагу заслуговує конструкція, зображена на рис. 13. Тут реалізовано принцип «динамічного зазору». Спеціальні виступи на бокових гранях головки не лише дистанціюють колосники один від одного, а й утворюють канали змінного перерізу. Така геометрія сприяє:

- турбулізації газового потоку: що покращує теплообмін між газом і робочою поверхнею колосника;
- механічному самоочищенню: під час розвантаження палет на барабані, за рахунок мінімального люфту в кріпленні, відбувається взаємне мікрозміщення колосників, що призводить до руйнування та видалення дрібних фракцій просипу, які застрягли в зазорах.

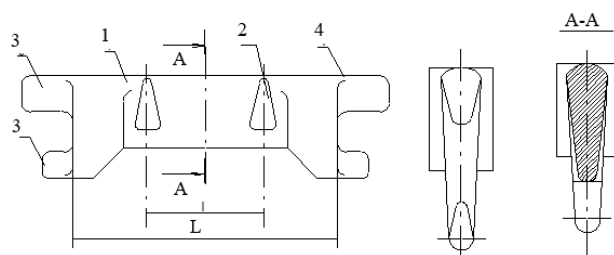


Рис. 13 – Конструкція колосника з трикутним перетином:
1 – тіло колосника; 2 – контактні поверхні; 3 – замкові частини; 4 – робоча поверхня колосника

7. Досвід зарубіжного проектування та вітчизняні промислові стандарти.

Аналіз світової практики підтверджує, що вибір конструкції колосника тісно пов'язаний зі специфікою сировинної бази та потужністю агрегатів.

На обпалювальних машинах у Польщі (рис. 14) перевага надається масивним конструкціям з посиленою нижньою частиною, що забезпечує високу жорсткість при значній товщині шару окатишів [11].

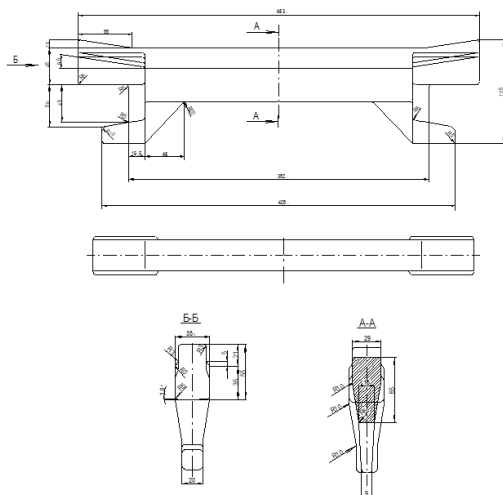


Рис. 14 – Конструкція колосника, що застосовується на обпалювальних машинах у Польщі

Німецька школа проектування (рис. 15) [11] орієнтована на «прямі» колосники з максимально чистими лініями профілю, що полегшує їх виготовлення методом точного лиття та забезпечує мінімальний опір повітря.

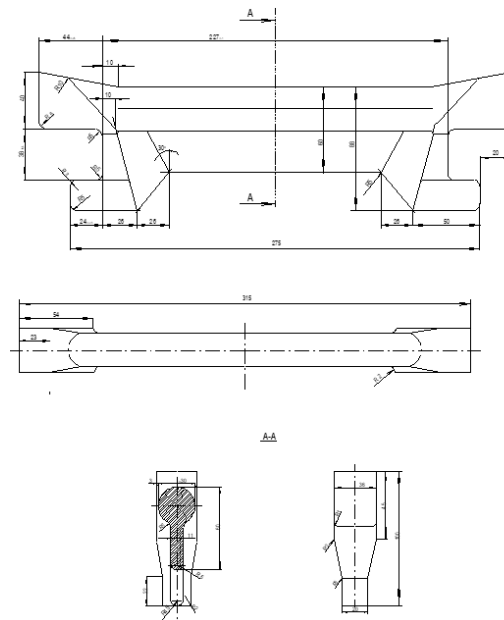


Рис. 15 – Конструкція колосника, що встановлюється на обпалювальних машинах в Німеччині

Конструкції, що застосовуються в Македонії (рис. 16) [11], вирізняються специфічною формою головки, оптимізованою для швидкої заміни в умовах коротких технологічних зупинок.

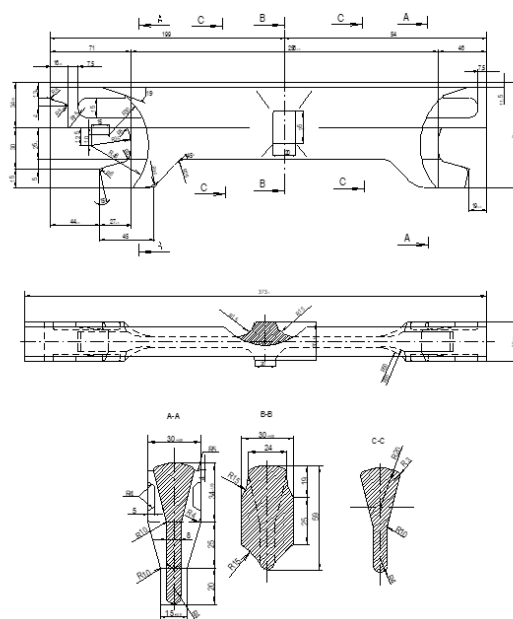


Рис. 16 – Конструкція колосника, що встановлюється на обпалювальних машинах в Македонії

Для українських підприємств, (зокрема розробок, орієнтованих на потужності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Північний гірничозбагачувальний комбінат» та ПрАТ «Центральний гірничозбагачувальний комбінат») притаманний акцент на підвищенні стійкості деталей до екстремальних механічних навантажень, що виникають при роботі з великими масами магнетитових окатишів.

Важливим прикладом функціональної модернізації є конструкція, наведена на рис. 17 [10].

Архітектура цього колосника розроблена з урахуванням необхідності мінімізації негативних наслідків термічного розширення та абразивного зносу:

- посилений профіль головки: У порівнянні з базовими моделями, ця конструкція має збільшений радіус переходу від робочої частини до зони підвісу, що суттєво знижує концентрацію напружень;
- система динамічних приливів: Розташування дистанційних елементів на бокових гранях спроектовано таким чином, щоб створювати ефект «самоочищення». Під час проходження палети через розвантажувальну зірочку, коли відбувається природне вібраційне зміщення колосників, ці приливи діють як механічні деструктори для коренів просипу, що застрягли у щілинах;
- геометрія торців: Оптимізована форма бокових стінок дозволяє зберігати стабільний «живий перетин» навіть при частковому термічному жолобленні деталі.

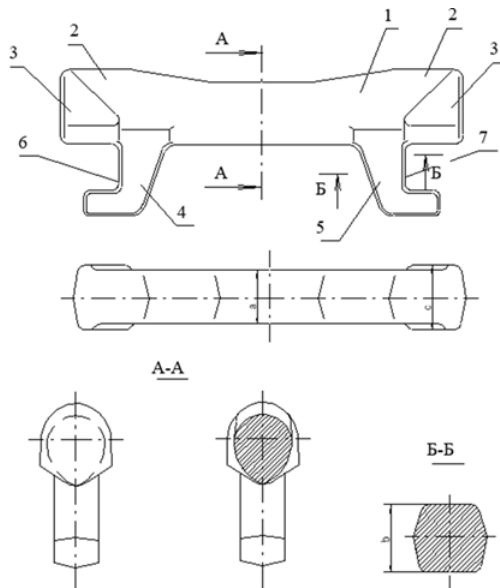


Рис. 17 – Колосник агрегаційної машини на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»: 1 – робоча частина колосника; 2 – бічна поверхня головок; 3 – прямолінійні приливи; 4, 5 – замки; 6, 7 – зиви

Традиційні «прямі» колосники (типовий представник – рис. 18, ПрАТ «ПівніГЗК»), що переважно застосовуються на конвеєрних машинах типу Lurgi-552, тривалий час були стандартом завдяки технологічній

простоті виготовлення. Однак, як показує аналіз експлуатаційних даних, така геометрія має суттєві обмеження: обмежена жорсткість у подовжньому напрямку та відсутність розвиненої системи теплообміну призводять до інтенсивного жолоблення (викривлення) під впливом циклічних термічних навантажень [8].

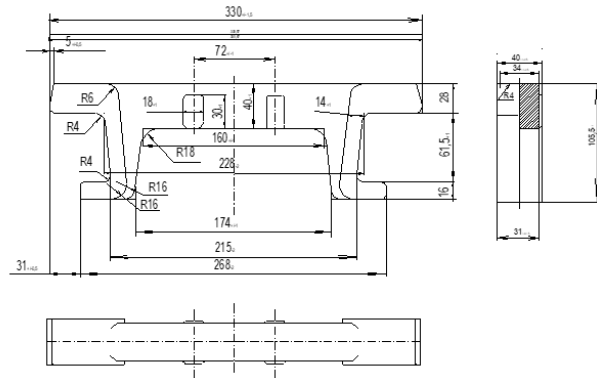


Рис. 18 – Прямий колосник обпалювальної машини на ПрАТ «ПівніГЗК»

Досліджені конструкції (рис. 1–17) демонструють спроби інженерів нівелювати недоліки традиційних систем шляхом зміни конфігурації дистанційних приливів та локальних потовщень. У порівнянні з ними, колосник машини ОК-324 (ПрАТ «ЦГЗК», рис. 19) [12] представляє якісно інший підхід, що базується на суттєвій інтенсифікації металоемності виробу.

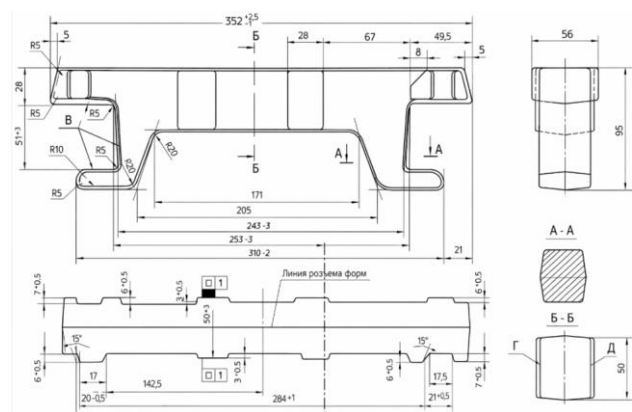


Рис. 19 – Прямий колосник обпалювальної машини на ПрАТ «ЦГЗК»

Маса колосника ЦГЗК становить 6,2 кг, що на 37% перевищує масу типового аналога системи Lurgi (ПрАТ «ПівніГЗК», 4,5 кг). Попри збільшення собівартості одиниці виробу та загального навантаження на привід палет, такий підхід забезпечує високу теплову інерційність та стабільність геометричної форми. Окремої уваги заслуговує модернізований вузол кріплення: система глибоких технологічних пазів (рис. 19) виконує функцію жорсткого просторового фіксатора,

що обмежує ступені свободи деталі при термічному розширенні та мінімізує ризик «наповзання» колосників один на одного.

Ефективність обраної стратегії підтверджується не лише зниженням питомої витрати змінного обладнання (0,012 кг/т проти 0,039 кг/т), а й стабільністю параметрів технологічного процесу. Підвищена металоемність та зміна профілю колосника ЦГЗК безпосередньо впливають на аеродинаміку шару та рівномірність термообробки окатишів. Оптимізація конструкції колосника спрямована на досягнення балансу між механічною надійністю та забезпеченням необхідного газодинамічного режиму, що є критичним для якості магнетитових окатишів.

Для кількісної оцінки цього балансу та підтвердження переваг посиленого профілю проведено розрахунок ключових характеристик жорсткості та термічної інерційності, які визначають стабільність газового тракту обпалювальної машини.

1. Розрахунок геометричної жорсткості колосників

Експлуатаційна довговічність колосника в умовах високотемпературного випалу визначається його здатністю чинити опір механічному вигину під дією маси шихти. При нагріванні металу до температур 800–1000°C межа текучості сталі суттєво знижується, тому геометрична жорсткість перерізу стає критичним фактором протидії залишковим деформаціям («жолобленню»).

1.1. Розрахункова модель

Для аналізу обрано найбільш навантажений робочий переріз колосника (рис. 18, 19). Розрахункова модель перерізу представлена у вигляді прямокутної балки, де несучим елементом є робоче тіло колосника, а дистанційні приливи (виступи) не враховуються як елементи, що сприймають основне навантаження [13].

Момент опору перерізу W_z визначається за класичною формулою опору матеріалів:

$$W_z = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (1)$$

де: b – робоча ширина колосника (без урахування приливів), мм; h – висота робочої частини профілю, мм.

1.2. Вихідні дані з технічних креслень

Згідно з кресленнями обох конструкцій, визначено наступні параметри:

- Колосник ОК-324: робоча ширина $b_1 = 41$ мм; висота $h_1 = 50$ мм.
- Колосник Lurgi-552: робоча ширина $b_2 = 34$ мм; висота $h_2 = 40$ мм.

1.3. Розрахунок моментів опору

На основі геометричних параметрів, визначених з технічних креслень, розрахунок моментів опору для обох конструкцій колосників проводиться згідно з формулою (1):

- Для колосника ОК-324:

$$W_{z1} = \frac{41 \cdot 50^2}{6} = 17085.$$

- Для колосника Lurgi-552:

$$W_{z2} = \frac{34 \cdot 40^2}{6} = 9067 \text{ мм}^2.$$

1.4. Оцінка переваги жорсткості (K_w)

Співвідношення жорсткості визначається як відношення моментів опору обох конструкцій:

$$K_w = \frac{W_{z1}}{W_{z2}} = \frac{17085}{9067} \approx 1,88. \quad (2)$$

Розрахунки (2) свідчать, що конструкція ЦГЗК має на 88% вищий запас жорсткості на вигин. Таке значне збільшення жорсткості досягається завдяки оптимізації геометричних параметрів (особливо висоти профілю). У промислових умовах це забезпечує стабільність геометрії ґрат протягом усього міжремонтного періоду, унеможливаючи виникнення залишкових деформацій (жолоблення) навіть при тривалій дії високих температур.

2. Оцінка термічної стійкості та теплової інерційності

Термічна деградація металу в умовах експлуатації обпалювальних машин зумовлена не лише впливом механічного навантаження і максимальних температур, але й високими градієнтами термічних напружень, що виникають при циклічному прогріві та охолодженні палет. Здатність колосника протистояти таким напруженням безпосередньо залежить від його теплової інерційності, яка визначає динаміку зміни температури конструкції та швидкість вирівнювання температурного поля.

Процес перенесення теплоти від поверхні вглиб масиву колосника описується законом теплопровідності Фур'є [14]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T,$$

де q – густина теплового потоку, λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{grad}T$ – градієнт температури.

У динамічних умовах обпалювальної машини саме цей закон визначає швидкість прогрівання металу: вищий градієнт температури при швидкій зміні середовища призводить до виникнення значних термічних напружень. Аналіз показує, що швидкість нагріву змінює теплові характеристики сталі, що необхідно враховувати при моделюванні температурного поля й прогнозуванні температурних градієнтів у масиві колосника під циклічними тепловими навантаженнями [15]. Враховуючи нестационарний характер нагріву, колосник розглядається як масивне тіло з певною тепловою ємністю, де кількість акумульованої теплоти визначає інтенсивність прогріву за законом теплового балансу:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_{\max} - T_{\min}), \quad (3)$$

де: c – питома теплоємність сталі, Дж/(кг·К); m – маса колосника, кг; $(T_{\max} - T_{\min})$ – амплітуда циклічної зміни температури поверхні колосника, К.

Згідно з рівнянням теплового балансу, кількість теплоти (Q), яку поглинає колосник під час

проходження через зони випалу, прямо пропорційна його масі (m).

Порівняння масових характеристик досліджуваних конструкцій свідчить про суттєву різницю в їхній тепловій інерційності: маса колосника ОК-324 складає $m_1 = 6,2$ кг, тоді як конструкція Lurgi-552 має масу $m_2 = 4,5$ кг. Оскільки обидві конструкції колосників виготовлені з однакового сплаву і працюють у тотожних температурних умовах ($\Delta T = \text{const}$, $c = \text{const}$), порівняльна оцінка їхньої теплової інерційності у відповідності до формули (3) зводиться до аналізу відношення мас m_1 та m_2 , що формалізується коефіцієнтом термічної інерційності K_t :

$$K_t = \frac{m_1}{m_2} = \frac{6,2}{4,5} \approx 1,38. \quad (4)$$

Аналіз результатів розрахунків за формулою (4) показує, що конструкція колосника на ПрАТ «ЦГЗК» має на 38% вищу теплову інерційність. Фізично це означає, що при рівних температурних умовах нагріву колосник цієї конструкції виступає як ефективний «тепловий демпфер». Завдяки збільшеній масі, метал повільніше реагує на різкі температурні коливання, що мінімізує швидкість зростання термічних напружень ($\frac{dT}{dt}$).

Згідно з законом Гука [13] для термічних деформацій, рівень напружень σ_t залежить від амплітуди температурних перепадів (ΔT):

$$\sigma_t = E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (5)$$

де: E – модуль Юнга матеріалу; α – коефіцієнт лінійного розширення.

Фізичний зміст рівняння (5) для умов жорсткого закріплення колосника в палеті полягає в тому, що обмеження вільного термічного розширення металу неминує призводить до виникнення внутрішніх механічних напружень. Параметр E визначає жорсткість зв'язку між температурною деформацією та виникаючими напруженнями: при заданому перепаді температур (ΔT) і незмінному коефіцієнті лінійного розширення (α), вищий модуль Юнга матеріалу генерує пропорційно вищі внутрішні напруження, що наближує метал до межі текучості.

Оскільки збільшена маса конструкції (рис. 19) виконує роль «теплового демпфера», вона обмежує швидкість прогріву поверхневих шарів металу та зменшує амплітуду локальних температурних коливань. Завдяки цьому вдається уникнути досягнення критичних пікових напружень σ_t , які є головним чинником зародження мікротріщин та подальшого незворотного жодження. Таким чином, збільшення маси колосника є обґрунтованим інженерним заходом для стабілізації температурного поля палети, що забезпечує підвищення термічної стійкості конструкції та запобігає її передчасному виходу з ладу через термічну втому металу.

3. Аналіз фактичного «живого перерізу» колосникового поля

Ефективність обпалювання окатишів значною мірою залежить від параметрів «живого перерізу» ($S_{\text{акт}}$) – сумарної площі зазорів, через які здійснюється просос теплоносія крізь шар шихти. Розрахунок проведено для стандартної палети розміром 4000×1500 мм.

3.1. Монтажна щільність наборки

В умовах реального виробництва ручна наборка не дозволяє досягти ідеальної проектної щільності. Введемо коефіцієнт монтажною щільності $k_m = N_{\text{факт}}/N_{\text{теор}}$, який показує, наскільки фактична кількість колосників відповідає проектній (теоретичній) можливості розміщення (табл. 1).

Ключовою відмінністю між досліджуваними конструкціями є спосіб фіксації колосників на палеті: в конструкції колосника ОК-324 завдяки наявності конструктивних пазів забезпечується жорстка фіксація колосників у посадкових місцях, що виключає їх зміщення. У Lurgi-552 через відсутність пазів k_m нижчий (0,930), що вказує на «ефект накопичення похибки» та меншу стабільність при ручній збірці.

Таблиця 1

Розрахунок коефіцієнту монтажу

Показник	ОК-324 (ЦГЗК)	Lurgi-552 (ПівнГЗК)
Проектна кількість ($N_{\text{теор}}$)	82 шт./ряд	100 шт./ряд
Фактична кількість ($N_{\text{факт}}$)	80 шт./ряд	93 шт./ряд
Коефіцієнт монтажу (k_m)	0,976	0,930

3.2. Розрахунок фактичного живого перерізу

Фактична площа зазорів на палеті ($S_{\text{факт}}$) визначається як добуток кількості колосників на палеті (N_3), робочої довжини (L_3) та ширини зазора (δ):

$$S_{\text{факт}} = N_3 \cdot L_3 \cdot \delta. \quad (6)$$

Для конструкції колосника (рис. 19) загальна кількість колосників на палеті – 320 шт., Робоча довжина одного колосника, що формує зазор, – 241,5 мм (0,2415 м), ширина зазора $\delta_1 = 7$ мм, по формулі (6) $S_{\text{факт}} = 0,5410$ м².

Для колосника Lurgi-552 (рис. 18) фактична кількість колосників складає 372 шт. на палеті. Робоча довжина колосника становить 215 мм (0,215 м) при ширині зазора $\delta_2 = 6$ мм, тоді, у відповідності з формулою (6), $S_{\text{факт}} = 0,4799$ м².

Розрахунки демонструють, що конструкція колосника ОК-324 забезпечує на 12,7% більшу площу живого перерізу (0,5410 м² проти 0,4799 м² у Lurgi-552), що забезпечує аеродинамічну стабільність, тобто рівномірну фільтрацію теплоносія через шар окатишів. Це усуває зони надмірного опору, характерні для вузьких зазорів (6 мм), та запобігає появі «холодних плям» (недопечених окатишів).

Збільшений зазор (7 мм) у конструкції ЦГЗК мінімізує ризик заклинювання дрібної фракції, що утворюється при руйнуванні окатишів. Це гарантує сталість газодинамічних характеристик палети протягом усього міжремонтного циклу.

Жорстка пазова фіксація колосника ЦГЗК унеможливує неконтрольований розподіл зазорів, що є головним недоліком конструкції ПівнГЗК. Відсутність пазових з'єднань в аналогах створює «ефект накопичення похибки»: нерівномірність кроку призводить до хаотичного розподілу повітряних потоків, утворення зон локального перегріву або «холодних плям» (зон непропівання шихти).

Натомість, конструкція ЦГЗК за рахунок стабільності фіксації забезпечує рівномірність розподілу аеродинамічного опору по всій площі палети. Це доводить, що менша номінальна площа щілин є цілеспрямованим інженерним рішенням.

4. Розрахунок газодинамічної пропускної здатності колосникового поля

Для оцінки впливу конструктивних особливостей колосників на аеродинамічний режим роботи обпалювальної машини проведемо аналіз взаємозв'язку між площею живого перерізу (S_z) та швидкістю фільтрації теплоносія (v_f).

4.1. Розрахунок швидкості потоку в зазорах

Якщо через палету проходить загальний об'єм повітря Q ($\text{м}^3/\text{с}$), то швидкість потоку в зазорі v_f залежить від фактичної площі $S_{\text{факт}}$. Чим менша площа при тому самому Q , тим вища швидкість потоку ($v_f = Q / S_{\text{факт}}$), що призводить до «ефекту ежекції» або «прориву» повітря [16].

Визначимо відносну швидкість потоку (v_f) для порівняння конструкцій:

$$v_f = \frac{Q}{S_{\text{факт}}} \quad (7)$$

Розрахунки по формулі (7) зведені в табл. 2.

Таблиця 2
Розрахунок швидкості фільтрації теплоносія в зазорах колосникових ґрат

Конструкція	$S_{\text{факт}}$ (м^2)	Відносна швидкість потоку (v_f)
ОК-324 (ЦГЗК)	0,5410	1,848
Lurgi-552 (ПівнГЗК)	0,4799	2,084

У конструкції Lurgi швидкість повітряного потоку в зазорах на 12,8% вища, ніж у ЦГЗК. Висока швидкість (за умови малої площі) провокує інтенсивний знос колосників (ерозію) та унесення дрібної фракції шихти (пилоунос).

4.2. Аеродинамічний опір колосникового поля

Для оцінки енергетичної ефективності колосникового поля доцільно розглянути залежність втрат тиску ΔP від геометричних характеристик зазорів. Згідно з рівнянням Дарсі-Вейсбаха, при проходженні потоку

крізь місцевий опір, втрати тиску пропорційні квадрату швидкості фільтрації:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v_f^2}{2}, \quad (8)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору, ρ – густина середовища (теплоносія).

Враховуючи, що v_f залежність втрат тиску від площі живого перерізу рівняння (8) набуває вигляду:

$$\Delta P \propto \zeta \cdot \frac{Q^2}{S_{\text{факт}}^2}. \quad (9)$$

При сталому об'ємному потоці ($Q = \text{const}$) та ідентичних умовах руху газу, враховуючи рівняння (9), відносну зміну аеродинамічного опору (R) можна оцінити через обернену пропорційність до квадрата площі живого перерізу:

$$R \propto \frac{1}{S_{\text{факт}}^2}. \quad (10)$$

Проведемо порівняльний розрахунок відносних показників опору для досліджуваних конструкцій (10):

Для конструкції Lurgi-552:

$$R_{\text{Lurgi}} \propto \frac{1}{(0,4799)^2} \approx 4,345.$$

Для конструкції ОК-324:

$$R \propto \frac{1}{(0,5410)^2} \approx 3,416.$$

Теоретичний аеродинамічний опір ґрат Lurgi-552 перевищує показник конструкції ОК-324 на 27,2%. Отримане значення підтверджує, що менший живий переріз конструкції Lurgi створює підвищене газодинамічне навантаження на систему тягодуттєвих машин, що призводить до зростання питомих енерговитрат на кожну тону готової продукції.

4.3. Газодинамічне обґрунтування вибору

З розрахунків випливає, що конструкція колосника ОК-324 працює в більш «м'якому» режимі:

1. Зниження аеродинамічного опору: завдяки більшій площі перерізу, вентиляторам палетної машини потрібно менше зусиль для прокачування теплоносія.

2. Зменшення пилоуносу: нижча швидкість фільтрації через зазори ($\sim 12,8\%$) дозволяє уникнути інтенсивного руйнування нижнього шару шихти та ерозії самих колосників.

Стабільність: оскільки колосник ОК-324 жорстко зафіксований пазами, площа $S_{\text{факт}}$ залишається стабільною протягом всієї експлуатації, тоді як у Lurgi швидкість потоку v хаотично змінюється в міру зміщення колосників.

Висновки

На основі проведеного порівняльного аналізу конструктивних та експлуатаційних характеристик колосників палетних машин типів ОК-324 (ЦГЗК) та Lurgi-552 (аналог ПівнГЗК), встановлено наступне:

1. Конструктивна жорсткість та стійкість до деформацій: Розрахунковим шляхом доведено, що збільшення площі поперечного перерізу та металоемності

колосника ОК-324 (маса 6,2 кг проти 4,5 кг у Lurgi) забезпечує вищу жорсткість конструкції. Це мінімізує термічне жолоблення в умовах циклічних теплових навантажень, запобігаючи неконтрольованій зміні геометрії зазорів.

2. Технологічність монтажу та стабільність «живого перерізу»: Встановлено, що наявність пазової фіксації в конструкції ЦГЗК нівелює вплив людського фактора при ручній наборці палети. Коефіцієнт монтажної щільності для ОК-324 становить 0,976, що значно вище за показник Lurgi (0,930). Це гарантує стабільність аеродинамічного опору по всій площі палети та виключає «ефект накопичення похибки», характерний для безпазових аналогів.

3. Ефективність газодинамічного режиму: Розрахунки фактичного «живого перерізу» продемонстрували перевагу конструкції ОК-324, яка забезпечує на 12,7% більшу площу зазорів (0,5410 м² проти 0,4799 м² у Lurgi-552). Це дозволяє знизити швидкість фільтрації теплоносія в зазорах, що зменшує абразивне зношування колосників та мінімізує винос дрібної фракції шихти (пилоунос).

4. Енергетична та технологічна ефективність: Теоретичний розрахунок аеродинамічного опору показав, що конструкція Lurgi-552 має на 27,2% вищий опір порівняно з ОК-324. Використання колосників ЦГЗК дозволяє знизити енерговитрати на привід тягодуттєвих машин та забезпечити рівномірне температурне поле в шарі шихти. Це є критичним фактором для усунення «холодних плям» (зон недопалу) та підвищення загальної якості готових магнетитових окатишів.

Таким чином, конструкція колосника ОК-324 з пазовою фіксацією є технічно обґрунтованим та прогресивним інженерним рішенням. Вона забезпечує стабільність технологічного процесу обпалювання, подовжує міжремонтний цикл палетних машин та підвищує техніко-економічні показники виробництва.

Перелік використаних джерел

- [1] New Technical Solutions for Increasing the Active Cross-Section Area of Fire Grates of Sintering Machine / E. Sigarev et al. *Science and Innovation*. 2024. Vol. 20, no. 1. Pp. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine20.01.087>.
- [2] Wei Y., Hu C., Liu X. Fatigue Analysis of Band Sintering Machine Trolley Grate Bars. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 246–247. Pp. 47–51. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.246-247.47>.
- [3] Панченко Г. М. Підвищення стійкості колосників конвеєрних машин огрудування залізрудних концентратів шляхом розробки й застосування економнолегованої електросталі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02. Дніпро : Національна металургійна академія України, 2014. 20 с.
- [4] Рудь Ю. С., Кучер В. Г., Белоножко В. Ю. Анализ конструкции и повышение технического уровня колосниковых решеток агломерационных и обжиговых машин. *Вісник Криворізького національного університету*. 2019. Вип. 48. С. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2019-1-48-94-99>.
- [5] Failure Analysis and Improvement Measures of Grate Bars Used in Iron Ore Pelletizing Plant / C. Sekhar et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. Pp. 6269–6283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05835-9>.
- [6] Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer Behavior during Iron Ore Sintering: A Review / H. Feng et al. *Metals*. 2023. Vol. 13, no. 7. Article 1277. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071277>.
- [7] Silva J. P., Teixeira S., Teixeira J. C. Development of a CFD Model to Study the Fundamental Phenomena Associated with Biomass Combustion in a Grate-Fired Boiler. *Processes*. 2025. Vol. 13, no. 8. Article 2617. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13082617>.
- [8] Панченко Г., Иванов А., Сусли Н. Колосники агломерационных и обпалювальных машин: условия работы, конструкции, технология производства : монография. Кривий Ріг : ДУЕТ, 2026. 132 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18846667>.
- [9] Учитель А. Д., Григорьева В. Г., Иванов А. С. Анализ конструкций колосников и колосниковых решеток для конвейерных обжиговых машин. *Научный вестник Кременчугского университета экономики, информационных технологий и управления. Серия: Новые технологии*. 2008. № 4(22). С. 175.
- [10] Анализ конструкций колосников агломерационных машин / Захарченко В. Н., Руденко Н. Р., Мусиенко К. А., Руденко Р. Н. *Металл и литье Украины*. 2015. № 6 (265). С. 18–22.
- [11] Технічна документація на колосники обпалювальних машин іноземного виробництва (Польща, Німеччина, Македонія). 2007. (Архів КП «ЗЛМЗ»).
- [12] Колосник обпалювальної машини № ОБ-403.01 : технічне креслення. 2016. 1 арк. (Архів ПрАТ «Центральний ГЗК»).
- [13] Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів : підручник / за ред. Г. С. Писаренка. 2-ге вид., доп. і перероб. Київ : Вища школа, 2004. 655 с.
- [14] Liu I. S. On Fourier's law of heat conduction. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 1990. Vol. 2. Pp. 301–305. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01129123>.
- [15] Fang H., Wong M. B., Bai Y. Heating rate effect on the thermophysical properties of steel in fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 128. Pp. 611–617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.016>.
- [16] Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 5th ed. Wiley India Pvt. Limited, 2009. 1004 p.

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF CAST GRATES AS A FACTOR FOR INTENSIFYING HEAT TRANSFER IN CONVEYOR UNITS FOR SINTERING METALLURGICAL RAW MATERIALS

Panchenko H.M.

PhD (Engineering), associate professor, State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7565-0380>, e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua;

Ivanov A.S.

Deputy Head of Pelletizing Plant for Engineering, PJSC Central GZK, Kryvyi Rih, e-mail: andrey.ivanov@metinvestholding.com

This research focuses on enhancing the operational reliability and service life of cast grate bars in thermal strengthening units for metallurgical raw materials. The investigation is necessitated by extreme cyclic thermal loads (400–1000°C) and the requirement to optimize equipment design for stable production cycles. The objective of this paper is to systematize factors affecting grate bar durability and provide an engineering justification for extending their inter-repair lifespan. Based on a comparative analysis grate bars of Lurgi-552 and OK-324 designs, the impact of geometric parameters on wear patterns was identified. A major focus is placed on the aerodynamic stability of the grate field. It was established that the rigid slot-fixation system in the OK-324 design eliminates the "error accumulation effect" typical of non-slotted analogs during manual assembly. The calculated mounting density coefficient for the slotted design reached 0.976, compared to 0.930 for the Lurgi-552 type. The scientific novelty of the investigation lies in determining the correlation between structural stiffness and thermal stress distribution. Calculations demonstrated that the optimized OK-324 design provides a 12.7% larger "live cross-section" area (0.5410 m² vs. 0.4799 m²), which lowers coolant filtration velocity and minimizes abrasive wear and dust loss. Furthermore, the theoretical aerodynamic resistance of the optimized field is 27.2% lower, significantly reducing the energy consumption of traction-blowing systems. The practical significance of the paper consists in developing recommendations for selecting effective grate bar configurations that increase the operating resource by 1.5–1.7 times without altering the technological cycle. These findings ensure uniform heat treatment of magnetite pellets by eliminating «cold spots» across the pallet area.

Keywords: cast grate bars; thermal strengthening of raw materials; operational durability; metallurgical equipment; technological process parameters; structural optimization; thermal degradation; wear resistance; resource saving.

References

- [1] E. Sigarev, R. Rudenko, K. Chubin, M. Kashcheev, M. Rudenko, and O. Chubina, "New Technical Solutions for Increasing the Active Cross-Section Area of Fire Grates of Sintering Machine," *Science and Innovation*, vol. 20, no. 1, pp. 87–96, 2024. doi: [10.15407/scine20.01.087](https://doi.org/10.15407/scine20.01.087).
- [2] Y. Wei, C. Hu, and X. Liu, "Fatigue Analysis of Band Sintering Machine Trolley Grate Bars," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 246–247, pp. 47–51, 2013. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.246-247.47](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.246-247.47).
- [3] H. M. Panchenko, "Pidvyshchennia stiikosti kolosnykh konveiernykh mashyn ohrudkuvannia zalizorudnykh kontsentrativ shliakhom rozrobky y zastosuvannia ekonomnolehovanoi elektrostali" ["Increasing the stability of the grates of conveyor machines for the pelletization of iron ore concentrates by developing and using economically alloyed electrical steel"], PhD thesis, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine, 2014. (Ukr.)
- [4] Yu. S. Rud, V. H. Kucher, V. Yu. Belonozhko, "Analiz konstruktsiy y povishenye tekhnicheskogo urovnia kolosnykovykh reshotok ahlomeratsyonnykh y obzhyhovykh mashyn" ["Analysis of the design and improvement of the technical level of grate bars of agglomeration and roasting machines"], *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Journal of Kryvyi Rih National University*, vol. 48, pp. 94–99, 2019. doi: [10.31721/2306-5451-2019-1-48-94-99](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2019-1-48-94-99). (Rus.)
- [5] C. Sekhar et al. "Failure Analysis and Improvement Measures of Grate Bars Used in Iron Ore Pelletizing Plant," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, pp. 6269–6283, 2021. doi: [10.1007/s11665-021-05835-9](https://doi.org/10.1007/s11665-021-05835-9).
- [6] H. Feng et al., "Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer Behavior during Iron Ore Sintering: A Review," *Metals*, vol. 13, no. 7, article 1277, 2023. doi: [10.3390/met13071277](https://doi.org/10.3390/met13071277).
- [7] J. P. Silva, S. Teixeira, and J. C. Teixeira, "Development of a CFD Model to Study the Fundamental Phenomena Associated with Biomass Combustion in a Grate-Fired Boiler," *Processes*, vol. 13, no. 8, article 2617, 2025. doi: [10.3390/pr13082617](https://doi.org/10.3390/pr13082617).
- [8] H. Panchenko, A. Ivanov, and N. Suslo, *Kolosnyky ahlomeratsiynykh i obpaliuvalnykh mashyn: umovy roboty, konstruktsii, tekhnolohiia vyrobnytstva : monohrafiia* [Grates of sintering and calcining machines: operating conditions, designs, production technology: monograph]. Kryvyi Rih, Ukraine: DUET Publ., 2026. doi: [10.5281/zenodo.18846667](https://doi.org/10.5281/zenodo.18846667). (Ukr.)
- [9] A. D. Uchytel, V. H. Hryhoreva, and A. S. Yvanov, "Analiz konstruktsiy kolosnykov y kolosnykovykh reshotok dlia konveiernykh obzhyhovykh mashyn" ["Analysis of grate and grate designs for conveyor kiln machines"], *Naukovyi visnyk Kremenchutskoho universytetu ekonomiky, informatsiynykh tekhnolohii i*

- upravlinnia. Serii: Novi tekhnologii – Scientific Bulletin of the Kremenchuk University of Economics, Information Technologies and Management. Series: New Technologies*, № 4(22), pp. 175, 2008. (Rus.)
- [10] V. N. Zakharchenko, N. R. Rudenko, K. A. Musyenko, and R. N. Rudenko, “Analiz konstruktsiyi kolosnykov ahlomeratsyonnikh mashyn” [“Analysis of grate designs for sintering machines”], *Metall y lytë Ukraini – Metal and casting of Ukraine*, № 6 (265), pp. 18–22, 2015. (Rus.)
- [11] Technical Documentation for Roasting Machine Grate Bars of Foreign Manufacture (Poland, Germany, Macedonia), 2007. Available: Archive of Zaporizhzhia Foundry and Mechanical Plant (ZLMZ). (Ukr.)
- [12] *Kolosnyk obpaliuvanoi mashyny № OB-403.01* : Technical Drawing, 2016. [Drawing]. Available: Archive of PrAT Central Iron Ore Enrichment Plant (CGZK). (Ukr.)
- [13] H. S. Pysarenko, O. L. Kvitka, and E. S. Umanskyi, *Opir materialiv : pidruchnyk* [Resistance of materials: textbook], , 2nd ed., G. S. Pisarenko, Ed. Kyiv, Ukraine: Vyshcha Shkola Publ., 2004. (Ukr.)
- [14] I. S. Liu, “On Fourier's law of heat conduction,” *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, vol. 2. pp. 301–305, 1990. doi: 10.1007/BF01129123.
- [15] H. Fang, M. B. Wong, and Y. Bai, “Heating rate effect on the thermophysical properties of steel in fire,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 611–617, 2017. doi: 10.1016/j.jcsr.2016.09.016.
- [16] F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed. New Delhi, India: Wiley India Pvt. Limited, 2009.
- Стаття надійшла 13.01.2026
Стаття прийнята 07.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Панченко Г. М., Іванов А. С. Аналіз конструкційних особливостей литих колосників як фактор інтенсифікації теплообміну в конвеєрних агрегатах термозміцнення металургійної сировини. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 230–242. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359812>.

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ УМОВ ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСІВ НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ЗАЛІЗА ТВЕРДИМ ВУГЛЕЦЕМ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ З ВЮСТИТУ

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 ;
Романенко А.А.	аспірант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0188-1693 , e-mail: romandnepr@i.ua ;
Бондаренко Я.І.	аспірант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3165-7020 , e-mail: torironi@gmail.com ;
Лопушин О.М.	магістрант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1805-3921 , e-mail: olegnl@atlanticgeyser.com.ua

Стаття присвячена дослідженню процесів навуглицювання заліза при відновленні з вюститу. У роботі проаналізовано сучасні наукові підходи до пояснення механізму навуглицювання заліза при його відновленні з вюститу твердим вуглецем. Показано, що в науковій літературі та на інтернет-ресурсах існують різні трактування цього процесу: як послідовності двох реакцій (відновлення Fe з FeO і подальшого утворення Fe₃C з відновленого Fe) або як єдиного процесу безпосереднього утворення карбиду заліза з вюститу. Окремі групи дослідників пов'язують навуглицювання заліза з дією газу CO, твердого вуглецю або їх спільною участю. На підставі результатів попередніх власних термодинамічних досліджень доведено неможливість перебігу реакцій (як окремих, так і спільної) відновлення заліза з вюститу та його навуглицювання газом CO за температур реальних металургійних процесів. Метою роботи є термодинамічний аналіз умов перебігу процесів навуглицювання заліза при відновленні його з вюститу твердим вуглецем як за окремими, так і за спільною хімічними реакціями, що їх описують, та з урахуванням всіх можливих комбінацій агрегатних станів речовин у реакціях. Методика дослідження базується на розрахунку температурної залежності зміни вільної енергії Гіббса для можливих варіантів зазначених реакцій із використанням виведених рівнянь на основі стандартних значень ентальпій і ентропій речовин, а також їх ентальпій і ентропій плавлення. У результаті проведеного термодинамічного аналізу встановлено, що жоден із варіантів окремих реакцій відновлення заліза з вюститу та подальшого навуглицювання утвореного заліза не може реалізуватися в реальних умовах роботи відновних печей. Доведено, що процеси відновлення та навуглицювання заліза не є послідовними стадіями, а відбуваються одночасно як єдиний процес утворення карбиду заліза з вюститу. Показано, що термодинамічно та фізико-хімічно можливим є лише варіант реакції безпосереднього утворення Fe₃C з вюститу за участю твердого вуглецю при температурах, що перевищують температуру плавлення FeO. Отримані результати уточнюють механізм відновлення заліза з гематиту при використанні твердого вуглецю та термодинамічно обґрунтовують, що кінцевим продуктом такого процесу є лише високотемпературне залізо – чавун. Правильне уявлення про зазначений процес дозволить створити його науково обґрунтовану фізико-хімічну модель, яка може бути використана для подальших досліджень і розробки інноваційних технологій прямого отримання сталі із залізорудної сировини з перспективами значного підвищення ефективності та енергозбереження сучасного сталеплавильного виробництва.

Ключові слова: відновлення; навуглицювання; хімічна реакція; термодинамічний аналіз; твердий вуглець; вюстит; карбід заліза; вільна енергія Гіббса; гранична температура; ентальпія; ентропія; чавун.

Постановка проблеми

Відновлення заліза з його оксидів, які входять до складу різних залізорудних матеріалів, здійснюється поетапно. Кожна стадія цього відновного процесу передбачає поступове відбирання кисню: спочатку – у початкового (найвищого) оксиду заліза, а потім – у всіх наступних (нижчих) оксидів, кожен з яких утворюється в результаті відщеплення кисню від попереднього (більш вищого) оксиду заліза.

Таким чином, процес відновлення заліза відбувається послідовно через утворення його проміжних оксидів за наступними двома схемами [1]:

- нижче 570 °C: Fe₂O₃ → Fe₃O₄ → Fe; (А)
- вище 570 °C: Fe₂O₃ → Fe₃O₄ → FeO → Fe (Б)

У металургії залізо з оксидів рудних матеріалів отримується за високотемпературною схемою (Б).

Водночас з цим відомо, що при використанні твердого вуглецю як відновника разом із газоподібним СО (який утворюється в хімічних реакціях з твердим вуглецем) отримане залізо завжди містить високий вміст вуглецю, тобто воно відновлюється виключно до стану чавуну (карбиду заліза Fe₃C) [2].

Процес навуглицювання заліза у реальних агрегатах, які застосовують вугілля як відновник, неминучий, що унеможливило отримання чистого (безвуглецевого) або маловуглецевого заліза як кінцевого продукту. Саме тому сучасні агрегати прямого відновлення заліза не мають змоги виробляти сталь безпосередньо із залізорудних матеріалів.

Наукові уявлення щодо процесу науглецювання заліза при відновленні його із залізородної сировини твердим вуглецем (коксом, вугіллям) висвітлені в численних літературних джерелах і навчальних матеріалах. У більшості випадків цей процес розглядається як складний гетерогенний фізико-хімічний процес, що відбувається внаслідок взаємодії речовин у різних агрегатних станах у ході низки хімічних реакцій. Водночас існуючі наукові підходи по-різному пояснюють механізм науглецювання заліза при його відновленні з вюститу, що формує неоднозначні, а інколи й помилкові уявлення про сутність цього процесу, зокрема серед здобувачів освіти під час їх навчання.

Частина дослідників розглядає отримання науглецюваного заліза як послідовність окремих стадій – відновлення з вюститу заліза та подальшого утворення карбіду заліза (Fe_3C), аналізуючи їх як самостійні процеси: $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ і $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$.

Інші наукові підходи трактують відновлення і науглецювання заліза як єдиний процес утворення карбіду заліза безпосередньо з вюститу: $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$.

Усі зазначені процеси розглядаються за участю газу CO [3], твердого вуглецю C [4, 5] або за їх спільної дії [6]. Крім того, у деяких роботах механізм процесу науглецювання заліза пояснюється взаємодією вюститу з сажистим вуглецем, який утворюється внаслідок диспропорціонування монооксиду вуглецю (CO) за реакцією Будуара; при цьому зазначений процес зводиться до взаємодії вюститу з газом CO .

Таким чином, наявність різних і частково суперечливих наукових підходів до пояснення механізму науглецювання заліза при відновленні його з вюститу свідчить про недостатню обґрунтованість існуючих уявлень про умови перебігу відповідних хімічних реакцій.

Водночас результати власного термодинамічного аналізу окремих хімічних реакцій відновлення заліза з вюститу [7, 8] та науглецювання відновленого заліза [9, 10] газом CO свідчать про те, що за температур реальних процесів у відновних печах окремо ці реакції не є термодинамічно можливими. Подібні висновки щодо термодинамічної неможливості перебігу спільного процесу відновлення з вюститу науглецюваного заліза газом CO , який у ряді джерел [2, 11–18] вважається основним механізмом формування карбіду заліза, були також зроблені при власному термодинамічному аналізі цього процесу [9, 10].

З огляду на це особливо актуальним є проведення комплексного термодинамічного аналізу процесу науглецювання заліза при відновленні його з вюститу твердим вуглецем, спрямованого на уточнення механізму цього процесу та встановлення умов його перебігу в реальних відновних агрегатах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Термодинамічні дослідження процесу науглецювання заліза у ході відновлення його з вюститу

твердим вуглецем становлять значну наукову цінність, оскільки дозволяють отримати чітке уявлення про механізм цього процесу. Таке дослідження може стати підґрунтям для створення інноваційних промислових технологій виробництва рідкої сталі безпосередньо із залізородної сировини, минаючи проміжну стадію виплавки чавуну, як це робилося у давнину в різних типах сиродутних горнів. До теперішнього часу одностадійну технологію виробництва рідкої сталі реалізувати у відновних печах не вдалося.

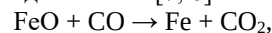
Як зазначалося вище, існуючі наукові підходи демонструють певні відмінності в уявленнях щодо науглецювання заліза під час його відновлення.

Окремі наукові концепції відзначають, що процес науглецювання вже відновленого заліза відбувається одночасно як за рахунок газу CO , так і під впливом твердого вуглецю C [2, 6, 19–25], при цьому вважаючи основною як газову [22], так і вуглецеву [24] карбюризацію відновлюваного заліза.

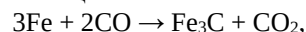
А.Д. Готліб (Доменний процес, 1966, с. 172–174), наводячи схему отримання карбіду заліза, стояв на позиції науглецювання відновленого заліза за рахунок газу CO (з якого утворювався сажистий вуглець, див. нижче). Однак поряд із цим він зазначав, що утворення Fe_3C можливе також науглецюванням відновленого заліза за рахунок твердого вуглецю; вважаючи його основним карбюризатором.

Деякі наукові підходи трактують процес отримання заліза з вюститу з науглецюванням металу дією газу CO , не надаючи при цьому жодних пояснень [3, 26]. Так у роботі [26] зазначається, що цементит утворюється із залізної руди в результаті реакції оксидів заліза з перенасиченими вуглецем газами на основі CH_4 або CO . І.І. Борнацький (Теорія металургійних процесів, 1978, с. 128, 129), Д.І. Рижонков із співробітниками (Теорія металургійних процесів, 1989, с. 126, 127), С.Й. Попель із співробітниками (Теорія металургійних процесів, 1986, с. 77, 78) вважали, що науглецювання заліза при відновленні його з вюститу відбувалося виключно за рахунок CO .

Однак результати проведеного власного термодинамічного аналізу окремих реакцій відновлення заліза з вюститу газоподібним CO [7, 8]:

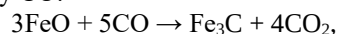


та науглецювання цього заліза газом CO [9, 10]:



показали, що при температурах, які відповідають реальному процесу у відновних печах, ці реакції не є термодинамічно можливими.

Крім того, власні термодинамічні дослідження [9, 10] показали, що при температурах, які відповідають реальному процесу у відновних печах, об'єднаний процес відновлення з вюститу науглецюваного заліза під впливом газу CO :



також не є термодинамічно можливим.

Отже, за рахунок газу СО процеси відновлення з вюстити заліза та його науглецювання не можуть відбуватися за жодною з цих трьох хімічних реакцій.

Інша частина наукових концепцій інтерпретує процес науглецювання відновленого заліза за рахунок дифузії сажистого вуглецю $C_{\text{саж}}$, утвореного внаслідок дисмутації монооксиду вуглецю (А.Д. Готліб, див. вище), молекули якого адсорбуються на поверхні заліза, за реакцією:

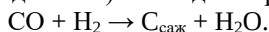


фактично зводячи процес до науглецювання заліза газоподібним СО [27–38].

Крім того, в науковій літературі наведені положення, які стверджують, що науглецювання вже відновленого заліза відбувається тільки твердим вуглецем [4, 5, 39–43]. При цьому, щоб гарантовано отримувати чавун із 2,0–4,0% С, надлишковий вміст вуглецю після повного відновлення заліза має регулюватися в діапазоні 2,5–4,5% [44].

Однак треба пам'ятати, що дисмутація монооксиду вуглецю за реакцією Будуара і утворення сажистого вуглецю $C_{\text{саж}}$ з газу СО термодинамічно може відбуватися лише за низьких температур: відповідно до власних термодинамічних розрахунків [7, 8] – виключно до граничної температури $T_{\text{гр}} = 709^\circ\text{C}$. За аналізом [7, 8] даних інших дослідників $T_{\text{гр}}$ знаходиться в інтервалі $557\text{--}750^\circ\text{C}$, за даними з інтернету [45] – $T_{\text{гр}} \approx 577^\circ\text{C}$. S. Geng із співробітниками [27] дає найвище значення граничної температури $T_{\text{гр}} = 761^\circ\text{C}$, до якого може утворюватися $C_{\text{саж}}$.

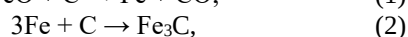
Ймовірно, що $C_{\text{саж}}$ утворюється із СО за високих температур лише у процесах прямого відновлення заліза метаном [26] або синтез-газом [30, 36–38] (у цій роботі не розглядаються) внаслідок перебігу реакції:



Тобто утворення сажистого вуглецю $C_{\text{саж}}$ за високих температур при відновних процесах на вугіллі (доменному, сиродутному тощо) є неможливим. Тому в них $C_{\text{саж}}$ не може брати участі при науглецюванні відновленого заліза. У зв'язку з цим спростовуються численні твердження про можливість науглецювання заліза сажистим вуглецем $C_{\text{саж}}$, що нібито утворюється внаслідок хімічної реакції авторедукції газу СО (див. вище) у вугільних відновних печах.

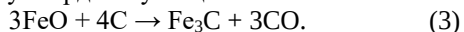
Отже, з високою ймовірністю можна вважати, що процес науглецювання заліза при його відновленні з вюстити відбувається виключно за рахунок твердого вуглецю. При цьому перебіг процесу можна описати такими варіантами:

– або двома реакціями відновлення заліза з вюстити і його науглецювання твердим вуглецем:



що відбуваються послідовно,

– або їх спільною реакцією відновлення карбиду заліза з вюстити твердим вуглецем



Таким чином, процес науглецювання заліза при його прямому відновленні твердим вуглецем С теоретично може відбуватися за наступними схемами:

– двостадійною: $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$, тобто за послідовними реакціями (1) і (2), що є доповненням ступінчастої схеми (Б) відновлення заліза при застосуванні твердого вуглецю;

– одностадійною: $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$, тобто за реакцією (3), що є зміною ступінчастої схеми (Б) відновлення заліза при використанні твердого вуглецю.

При цьому реагенти і продукти реакцій можуть знаходитися у будь-яких агрегатних станах.

Тому, для з'ясування можливості перебігу різних варіантів хімічних реакцій (1)–(3) за реальних температур робочого простору відновних печей, необхідно провести їх комплексний термодинамічний аналіз. Це дозволить визначити діапазони температур перебігу $T_{\text{пр}}$ для кожної з можливих реакцій.

Мета статті

Мета роботи – термодинамічний аналіз варіантів хімічних реакцій (1)–(3) відновлення з вюстити та науглецювання заліза твердим вуглецем з метою з'ясування умов їх перебігу. Дослідження охоплюють всі можливі комбінації агрегатних станів FeO (вюстити), відновленого Fe (чистого заліза) та утвореного з нього Fe_3C (чавуну), дозволяючи визначити ймовірність перебігу всіх варіантів кожної з реакцій (1)–(3). У випадку термодинамічної можливості перебігу певної реакції з'ясовується діапазон температур, при яких цей процес може відбуватися на практиці (термодинамічний аналіз твердофазної реакції (1) був виконаний у роботах [46, 47] при вивченні процесу відновлення заліза з гематиту твердим вуглецем).

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – металургійний процес ступінчастого відновлення заліза з гематиту у відновних печах твердим вуглецем.

Предмет дослідження – процес науглецювання заліза при його відновленні з вюстити твердим вуглецем.

Дослідження передбачали розрахунок граничних температур $T_{\text{гр}}$ для визначення діапазону значень теоретичних температур, у якому перебіг реакцій науглецювання відновленого заліза твердим вуглецем є термодинамічно можливим. З метою визначення $T_{\text{гр}}$ були виведені та використані вирази для розрахунку залежних від температури T (у К) значень вільної енергії Гіббса (ізобарно-ізотермічного потенціалу) ΔG_T^0 для варіантів реакцій (1)–(3) відновлення з вюстити та науглецювання заліза твердим вуглецем С з урахуванням усіх можливих комбінацій агрегатних станів речовин, що беруть участь у цих реакціях. Для проведення обчислень та обробки результатів

розрахунків використовувалася комп'ютерна програма MS Excel 2013.

Виведення розрахункових формул для визначення енергії Гіббса ΔG_T^0 здійснювалося за наведеною в джерелах [48, 49] методикою при використанні стандартних значень ентальпій утворення необхідних речовин $\Delta H_{f,298}^0$ та їх ентропій ΔS_{298}^0 , а також ентальпій $\Delta H_{пл}^0$ та ентропій $\Delta S_{пл}^0$ плавлення [50]. Значення тих із них, що беруть участь у процесах відновлення та науглецювання заліза твердим вуглецем C, наведені в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1

Стандартні значення ентальпії $\Delta H_{f,298}^0$ та ентропії ΔS_{298}^0 для твердих речовин і газів

Речовина	Стан	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/(моль·К)
Fe	кристалічний	0	27,15
FeO	кристалічний	- 264,8	60,8
Fe ₃ C	кристалічний	25	105,1
C	кристалічний (графіт)	0	5,74
O ₂	газ	0	205,04
CO	газ	- 110,52	197,54

Таблиця 2

Значення ентальпії плавлення $\Delta H_{пл}^0$ та ентропії плавлення $\Delta S_{пл}^0$ для рідких речовин

Речовина	Стан	$\Delta H_{пл}^0$, кДж/моль	$\Delta S_{пл}^0$, Дж/(моль·К)
Fe	рідкий	13,8	7,6
FeO	рідкий	30,8	18,7
Fe ₃ C	рідкий	17	11,5

Методика виведення розрахункових формул для обчислення ізобарно-ізотермічного потенціалу ΔG_T^0 полягала у наступному [48, 49].

Відомо [51], що будь-який хімічний процес характеризується ентальпійним (ΔH^0) та ентропійним ($T \cdot \Delta S^0$) факторами, які протилежні один одному, однак діють одночасно. У процесах, що відбуваються за певних температур та при постійному тиску, підсумковий ефект цих факторів визначає зміну ізобарно-ізотермічного потенціалу ΔG_T^0 для кожної реакції.

Виходячи з наслідків закону Гесса, значення вільної енергії Гіббса ΔG_T^0 для будь-якої хімічної реакції змінюється залежно від температури T (у К) і визначається за такою формулою [48, 49]:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0, \quad (4)$$

де ΔH^0 та ΔS^0 – ентальпія (Дж/моль) та ентропія (Дж/(моль·К)) аналізованої хімічної реакції відповідно; знаходяться за наступними виразами [48, 49]:

$$\Delta H^0 = \sum H_{\text{прод.}}^0 - \sum H_{\text{поч.}}^0 = d \cdot \Delta H_4^0 + c \cdot \Delta H_3^0 - b \cdot \Delta H_2^0 - a \cdot \Delta H_1^0; \quad (5)$$

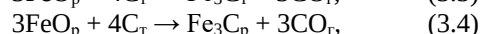
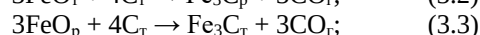
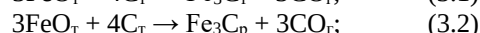
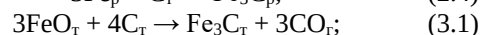
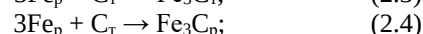
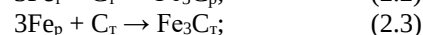
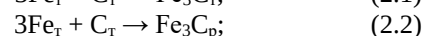
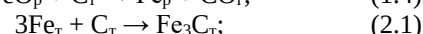
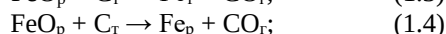
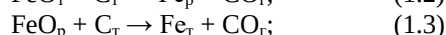
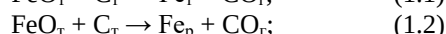
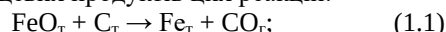
$$\begin{aligned} \Delta S^0 &= \sum S_{\text{прод.}}^0 - \sum S_{\text{поч.}}^0 = \\ &= d \cdot \Delta S_4^0 + c \cdot \Delta S_3^0 - b \cdot \Delta S_2^0 - a \cdot \Delta S_1^0, \quad (6) \end{aligned}$$

де ΔH_1^0 , ΔH_2^0 і ΔH_3^0 , ΔH_4^0 та ΔS_1^0 , ΔS_2^0 і ΔS_3^0 , ΔS_4^0 – стандартні ентальпії утворення реагентів (початкових речовин) і продуктів реакції відповідно, Дж/моль, та їх ентропії, Дж/(моль·К)), див. табл. 1; $\sum H_{\text{поч.}}^0$ і $\sum H_{\text{прод.}}^0$ та $\sum S_{\text{поч.}}^0$ і $\sum S_{\text{прод.}}^0$ – суми стандартних ентальпій утворення для реагентів і продуктів реакції відповідно, Дж/моль, та їх ентропій, Дж/(моль·К); a, b, c, d – стехіометричні числа для певної хімічної реакції (параметри ΔH_4^0 і ΔS_4^0 з коефіцієнтом d будуть відсутні у виразах (5) і (6) для реакції (3)).

При розрахунку ентальпій утворення реагентів і продуктів реакції у рідкому стані та їх ентропій враховувалися значення ентальпій $\Delta H_{пл}^0$ та ентропій $\Delta S_{пл}^0$ плавлення цих речовин (див. табл. 2).

Виклад основного матеріалу

Проаналізовано можливість перебігу різних варіантів хімічних реакцій (1)–(3), що передбачають всі можливі поєднання агрегатних станів (індекси їх позначення: т – твердий, р – рідкий, г – газоподібний) реагентів та кінцевих продуктів цих реакцій:



Для цього були виведені формули, що дозволяють розрахувати значення вільної енергії Гіббса ΔG_T^0 для хімічних реакцій (1.1)–(1.4), (2.1)–(2.4) і (3.1)–(3.4) як функцію температури T (у К).

Для хімічної реакції (1.1) отримана формула має вигляд [52, 53]:

$$\Delta G_T^0(1.1) = 154280 - 158,15 \cdot T, \text{ Дж/моль CO (I.I)}$$

Для хімічних реакцій (1.2)–(1.4) отримані формули мають вигляд [54]:

$$\Delta G_T^0(1.2) = 168080 - 165,75 \cdot T, \text{ Дж/моль CO; (I.II)}$$

$$\Delta G_T^0(1.3) = 123480 - 139,45 \cdot T, \text{ Дж/моль CO; (I.III)}$$

$$\Delta G_T^0(1.4) = 137280 - 147,05 \cdot T, \text{ Дж/моль CO (I.IV)}$$

Для хімічних реакцій (2.1)–(2.4) отримані формули мають вигляд [55]:

$$\Delta G_T^0(2.1) = 25000 - 17,91 \cdot T, \text{ Дж/моль; (II.I)}$$

$$\Delta G_T^0(2.2) = 42000 - 29,41 \cdot T, \text{ Дж/моль; (II.II)}$$

$$\Delta G_T^0(2.3) = -16400 + 4,89 \cdot T, \text{ Дж/моль; (II.III)}$$

$$\Delta G_T^0(2.4) = 600 - 6,61 \cdot T, \text{ Дж/моль (II.IV)}$$

Для хімічних реакцій (3.1)–(3.4) отримані формули мають вигляд [56]:

$$\Delta G_T^0(3.1) = 487840 - 492,36 \cdot T, \text{ Дж/моль; (III.I)}$$

$$\Delta G_T^0(3.2) = 504840 - 503,86 \cdot T, \text{ Дж/моль; (III.II)}$$

$$\Delta G_T^0(3.3) = 395440 - 436,26 \cdot T, \text{ Дж/моль; (III.III)}$$

$$\Delta G_T^0(3.4) = 412440 - 447,76 \cdot T, \text{ Дж/моль (III.IV)}$$

При цьому для кожної з хімічних реакцій (1.1)–(1.4), (2.1)–(2.4) і (3.1)–(3.4) гранична температура $T_{\text{гр}}$ обчислювалася за такою формулою:

$$t = \Delta H^0 / \Delta S^0 - 273, ^\circ\text{C},$$

використовуючи значення ΔH^0 і ΔS^0 з отриманих формул (I.I)–(I.IV), (II.I)–(II.IV) і (III.I)–(III.IV), тобто за досягнення умови хімічної рівноваги $\Delta G_T^0 = 0$ відповідно для кожної із зазначених реакцій.

Аналіз можливості перебігу варіантів хімічних реакцій (1)–(3), що описані реакціями (1.1)–(1.4), (2.1)–(2.4) і (3.1)–(3.4), здійснено за виведеними формулами (I.I)–(I.IV), (II.I)–(II.IV) і (III.I)–(III.IV) та з урахуванням температур плавлення $t_{\text{пл}}$ речовин, що беруть участь у відповідних реакціях:

– Fe (безвуглецеве залізо): згідно з діаграмою стану системи «залізо–вуглець», для безвуглецевого (чистого) заліза температура плавлення $t_{\text{пл}}^{\text{Fe}} = 1539^\circ\text{C}$ [57], хоча в деяких інших джерелах наводяться значення в діапазоні 1535–1539°C;

– FeO (вюстит): для чистого FeO (без домішок CaO та SiO₂) $t_{\text{пл}}^{\text{FeO}} = 1377^\circ\text{C}$ [58], хоча в деяких джерелах наводиться діапазон 1360–1425°C. Водночас FeO, завдяки можливості утворення легкоплавкої евтектики «вюстит+фаяліт», може перебувати у рідкому стані. Згідно з діаграмою системи «вюстит–кремнезем» [59, 60], мінімальна температура плавлення цієї евтектики $t_{\text{пл}}^{\text{евт}} = 1177^\circ\text{C}$ (за джерелами [61–64] знаходиться у межах 1173–1188°C). Таким чином, у певних випадках $t_{\text{пл}}^{\text{FeO}} = t_{\text{пл}}^{\text{евт}}$;

– Fe₃C (карбід заліза): для чавуну з вмістом 4% C температура плавлення $t_{\text{пл}}^{\text{Fe}_3\text{C}} = 1150^\circ\text{C}$ [65].

Високі температури робочого простору сучасної доменної печі сягають 1900–2200°C. Це забезпечує відновлення заліза з ефективністю 99,0–99,8% (доменний шлак містить <1% FeO) із будь-яких залізрудних матеріалів, навіть якщо їх температури плавлення високі. Така універсальність доменної печі вводить в оману та призводить до помилкових висновків при аналізі результатів термодинамічної оцінки процесу відновлення в ній заліза. Тому для більш коректної інтерпретації отриманих даних за реальні умови відновного процесу значення температури у робочому просторі сиродутного горна (нім. *Renofen*) приймаємо 1200°C [66] замість температур робочого простору доменної печі.

За допомогою виведених виразів (I.I)–(I.IV) були проаналізовані умови перебігу всіх можливих варіантів (1.1)–(1.4) хімічної реакції (1) відновлення заліза з вюститу за рахунок твердого вуглецю:

– реакція (1.1), згідно з виразом (I.I), є термодинамічно можливою понад граничну температуру $T_{\text{гр}} = 703^\circ\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, до 1177°C (до якої FeO може перебувати у твердому стані), однак вона є ендотермічною і у

твердій фазі реагентів *на практиці відбуватися не може*, адже твердофазні реакції зазвичай повинні бути екзотермічними [67] для порушення стабільності кристалічних ґраток, що досягається при нагріванні;

– реакція (1.2), згідно з виразом (I.II), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 741^\circ\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, до 1177°C, однак вона *не має фізико-хімічного змісту*, бо в цьому інтервалі температур Fe ($t_{\text{пл}}^{\text{Fe}} = 1539^\circ\text{C}$) у рідкому стані перебувати не може; до того ж, подібно до реакції (1.1), вона є ендотермічною, тому не може перебігати, якщо її реагенти знаходяться у твердій фазі;

– реакція (1.3), згідно з виразом (I.III), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 613^\circ\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, теоретично вона могла б перебігати в інтервалі 1177–1539°C, однак *на практиці відбуватися не може*, бо в реальних умовах залізо, що відновлене у будь-якій печі за надлишку вуглецю, є високовуглецевим, тобто знаходиться у стані чавуну (Fe₃C) [2], а не чистого заліза (Fe); при цьому за стехіометричного співвідношення FeO:C або при нестачі твердого вуглецю процес відновлення Fe на практиці взагалі не відбувається;

– реакція (1.4), згідно з виразом (I.IV), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 661^\circ\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, теоретично вона могла б перебігати вище 1539°C, проте подібно до реакції (1.3), *на практиці відбуватися не може* через незмогу отримати чисте залізо (Fe) в будь-якій відновній печі, де завжди утворюється чавун (карбід заліза Fe₃C), а у сиродутному горні це додатково зумовлено низькою температурою робочого простору.

Таким чином, жоден із варіантів (1.1)–(1.4) реакції (1) відновлення заліза з вюститу твердим вуглецем не відбувається в реальних умовах відновної печі, хоча термодинамічно вони можливі при температурах, що перевищують їх $T_{\text{гр}}$.

Також були проаналізовані умови перебігу всіх можливих варіантів (2.1)–(2.4) хімічної реакції (2) науглецювання відновленого заліза твердим вуглецем за виведеними формулами (II.I)–(II.IV):

– реакція (2.1), згідно з виразом (II.I), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 1123^\circ\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, до 1150°C (до цього значення Fe₃C знаходиться у твердому стані), однак у твердому стані реагуючих речовин вона *не може відбуватися на практиці*, оскільки твердофазні реакції повинні бути екзотермічними [67], а реакція (2.1) є ендотермічною;

– реакція (2.2), згідно з виразом (II.II), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 1155^\circ\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$ (при цьому Fe₃C перебуває у рідкому стані), до 1539°C (до цього значення Fe перебуває у твердому стані), однак, подібно до реакції (2.1), вона є ендотермічною, тому у твердому стані реагуючих речовин *не може відбуватися на практиці*;

– реакція (2.3), згідно з виразом (II.III), є термодинамічно можливою до $T_{\text{гр}} = 3081^{\circ}\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, однак вона *не має фізико-хімічного змісту*, оскільки вище 1539°C (коли залізо перебуває у рідкому стані) Fe_3C (чавун) не може залишатися у твердому стані (його температура плавлення становить 1150°C), а у сиродутному горні залізо взагалі не може перебувати у рідкому стані через низьку (меншу за 1539°C) температуру робочого простору печі;

– реакція (2.4), згідно з виразом (II.IV), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = -182^{\circ}\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, теоретично вона могла б перебігати вище 1539°C , однак, як і реакція (2.3), вона *не може відбуватися на практиці* через неможливість перебування заліза у рідкому стані за низьких температур ($1200\text{--}1250^{\circ}\text{C}$) робочого простору сиродутного горна.

Крім того, чисте залізо не може відновлюватися за варіантами (1.1)–(1.4) реакції (1) в умовах реального процесу у відновній печі за надлишку твердого вуглецю (див. вище).

Отже, всі варіанти (2.1)–(2.4) реакції (2) втрачають фізико-хімічний зміст, оскільки відновлене безвуглецеве залізо, що піддається науглецюванню, у реальному агрегаті буде відсутнє. Тобто реакції (2.1)–(2.4), як і реакції (1.1)–(1.4), не можуть відбуватися ні у сиродутному горні, ні у доменній печі. Проте залізо у цих агрегатах все ж таки здатне відновлюватися та науглецюватися.

Це свідчить, що процеси прямого відновлення з вюститу заліза і його науглецювання твердим вуглецем не є окремими етапами (тобто спочатку одна з відновних реакцій (1), а потім – одна з реакцій (2) науглецювання) технології отримання заліза з його оксидів. Без сумніву, вони становлять один нерозривний етап відновлення з вюститу твердим вуглецем науглецюваного (високовуглецевого) заліза – чавуну (Fe_3C), що відбувається за одним із варіантів (3.1)–(3.4) реакції (3).

Враховуючи це, за виведеними виразами (III.I)–(III.IV) були проаналізовані всі можливі варіанти (3.1)–(3.4) хімічної реакції (3) відновлення науглецюваного заліза з вюститу твердим вуглецем, тобто отримання з вюститу безпосередньо карбіду заліза (чавуну), з метою визначення можливості та умов їх перебігу:

– реакція (3.1), згідно з виразом (III.I), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 718^{\circ}\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, до 1150°C (де Fe_3C перебуває у твердому стані), проте за участю реагентів у твердому стані ця реакція *на практиці не може відбуватися*, оскільки твердофазні процеси мають бути екзотермічними [67], тоді як реакція (3.1) є ендотермічною;

– реакція (3.2), згідно з виразом (III.II), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 729^{\circ}\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, теоретично вона

могла б перебігати в інтервалі $1150\text{--}1177^{\circ}\text{C}$ (де Fe_3C перебуває у рідкому, а FeO – у твердому стані), однак, подібно до реакції (3.1), вона *на практиці не може відбуватися*, адже одночасно є ендотермічною та твердофазною, що робить її неможливою;

– реакція (3.3), згідно з виразом (III.III), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 633^{\circ}\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, однак вона *не має фізико-хімічного змісту*, тому що до 1150°C (де Fe_3C знаходиться у твердій фазі) вюстит не може перебувати у рідкому стані (його мінімальна температура плавлення становить 1177°C);

– реакція (3.4), згідно з виразом (III.IV), є термодинамічно можливою понад $T_{\text{гр}} = 648^{\circ}\text{C}$, за якої для неї виконується умова $\Delta G_T^0 = 0$, і реакція *може відбуватися на практиці*, однак лише понад 1177°C , тобто за умов, коли FeO та Fe_3C можуть перебувати у рідкому стані.

Отже, з усіх аналізованих реакцій може перебігати лише хімічна реакція (3.4).

Результати та їх обговорення

Рис. 1 ілюструє зміну вільної енергії Гіббса ΔG_T^0 залежно від температури T (у $^{\circ}\text{C}$) для реакції (3.4) отримання рідкого карбіду заліза (Fe_3C) за рахунок взаємодії рідкого вюститу (FeO) з твердим вуглецем (C), а також для реакцій (1.4) і (2.4), які є, за своєю суттю, послідовними етапами реакції (3.4): відновлення з рідкого вюститу рідкого заліза і отримання з останнього рідкого карбіду заліза відповідно. Наведені залежності побудовані з використанням виведених виразів (I.IV), (II.IV) і (III.IV) [52–56] для розрахунку вільної енергії Гіббса ΔG_T^0 зазначених реакцій та з подальшим аналізом отриманих результатів [68].

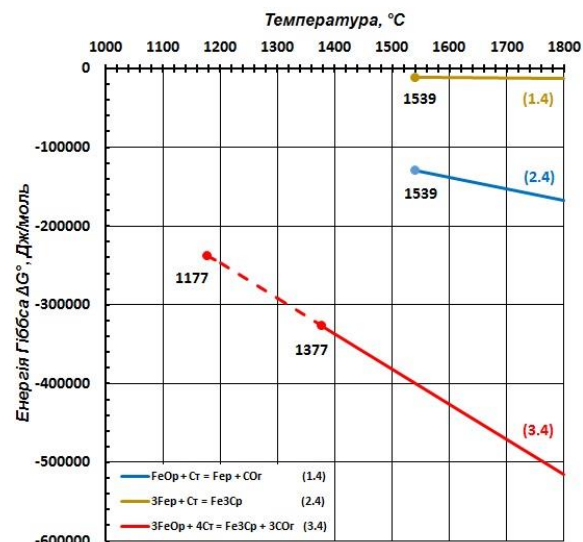


Рис. 1 – Залежності ΔG_T^0 від T (в $^{\circ}\text{C}$) для реакцій (1.4), (2.4) і (3.4), що отримані за виведеними виразами (I.IV), (II.IV) і (III.IV) відповідно

Мимовільний перебіг реакцій (1.4), (2.4) і (3.4) у прямому напрямку є термодинамічно можливим, оскільки вище їх граничних температур $T_{\text{пр}}$ для кожної з них виконується умова $\Delta G_T^0 < 0$. Водночас існують певні обмеження, що пов'язані із практичними аспектами реалізації цих реакцій.

Реакція (2.4) єдина з усіх варіантів (2.1)–(2.4) хімічної реакції (2) могла б відбуватися в доменній печі при температурах перебігу $T_{\text{пр}} > 1539^\circ\text{C}$ за умови отримання рідкого чистого (безвуглецевого) заліза за реакцією (1.4). Ця реакція, у свою чергу, єдина серед варіантів (1.1)–(1.4) реакції (1), яка могла б мати місце при отриманні в домні рідкого безвуглецевого заліза, але на практиці вона неможлива через використання твердого вуглецю як відновника (див. вище).

Отримання рідкого безвуглецевого заліза, ймовірно, можливе лише за відновлення його воднем при $T_{\text{пр}} > 1539^\circ\text{C}$ за реакцією: $\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$, що виключає утворення карбіду заліза.

Термодинамічним аналізом процесів, які описані варіантами (3.1)–(3.4) хімічної реакції (3) відновлення з вюститу навуглецьованого заліза твердим вуглецем, встановлено, що можливою у будь-якій відновній печі буде тільки реакція (3.4). Вона відповідає як законам термодинаміки, так і практичним реаліям відновної плавки: при використанні як відновника твердого вуглецю кінцевим продуктом завжди виступає навуглецьоване залізо у стані чавуну (Fe_3C) [2], оскільки отримати чисте залізо (без розчиненого в ньому вуглецю) за надлишку твердого вуглецю неможливо.

Існує стійка думка, що при температурах робочого простору сиродутного горна залізо не може навуглецьовуватися до стану чавуну. Однак, за даними А.М. Зборщика, розчинність вуглецю в залізі при $1153\text{--}2100^\circ\text{C}$ становить $4,26\text{--}7,0\%$. За даними R. Ripan і I. Chetianu [69] навуглецьовання заліза при $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ дозволяє отримати евтектичний чавун з $4,3\%$ вуглецю.

Єдиним обмеженням для перебігу реакції (3.4) є температура. Тому реакція буде можлива лише при досягненні температур, що є вищими за температуру плавлення вюститу. Сиродутний горн дозволяв отримувати залізо при температурах $1177\text{--}1200^\circ\text{C}$, що добре кореспондується з даними роботи [70]. Бажано, щоб температура плавлення вюститу була максимально близькою до нижньої межі наведеного діапазону, проте не завжди можливо забезпечити для вюститу таке низьке значення температури плавлення.

На рис. 1 пунктирна ділянка лінії енергії Гіббса ΔG_T^0 хімічної реакції (3.4) відповідає вюститу, що знаходиться при температурах, нижчих за $t_{\text{пл}}^{\text{FeO}}$ чистого FeO , перебуваючи при цьому у рідкому стані.

Доменна піч не має такого обмеження, адже її робочий простір досягає надзвичайно високих температур – від 1900 до 2200°C . Це дозволяє повністю розплавити вюстит, не зважаючи на його температуру плавлення $t_{\text{пл}}^{\text{FeO}}$, що, згідно з діаграмою системи «вюстит–

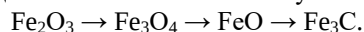
кремнезем» [59, 60], може варіюватися в межах $1177\text{--}1377^\circ\text{C}$.

Тобто від температури плавлення вюститу $t_{\text{пл}}^{\text{FeO}}$ залежать температури перебігу $T_{\text{пр}}$ реакції (3.4), значення яких завжди будуть більшими за $t_{\text{пл}}^{\text{FeO}}$, тобто $T_{\text{пр}} > t_{\text{пл}}^{\text{FeO}}$.

Таким чином, проведений у роботі термодинамічний аналіз процесу навуглецьовання твердим вуглецем відновленого з вюститу заліза дозволив встановити, що процеси прямого відновлення з вюститу металевого заліза та навуглецьовання останнього твердим вуглецем становлять нерозривний і завершальний етап загального процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту (або з магнетиту). При цьому, внаслідок взаємодії вюститу, утвореного з магнетиту за допомогою газу CO , з твердим вуглецем одразу утворюється навуглецьоване залізо з вмістом вуглецю близько 4% (чавун, карбід заліза Fe_3C), а не чисте (безвуглецеве) залізо (Fe).

Це підтверджується також роботами [30, 71], які стверджують, що відновлення залізу з гематиту та утворення цементиту (Fe_3C) відбуваються одночасно.

З урахуванням цього, високотемпературна схема (Б) процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту при застосуванні у відновній печі твердого вуглецю як відновника змінюється і набуває вигляду:



При цьому, враховуючи раніше отримані результати [7–10, 46, 47, 52–56], дві перші стадії даного процесу ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ і $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$) відбуваються виключно за рахунок газу CO , а остання стадія ($\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$) – виключно за рахунок твердого вуглецю C .

Таким чином, вперше теоретично обґрунтовано, що кінцевим продуктом ступінчастого відновлення заліза з гематиту (або магнетиту) твердим вуглецем завжди є чавун (карбід заліза Fe_3C), а не чисте (безвуглецеве) залізо (Fe).

Висновки

Проведено термодинамічний аналіз з метою з'ясування можливості перебігу варіантів хімічних реакцій навуглецьовання заліза, відновленого з вюститу твердим вуглецем, з урахуванням різних агрегатних станів реагуючих речовин і продуктів реакцій.

Встановлено, що жоден із варіантів (1.1–1.4) реакції (1) відновлення чистого заліза з вюститу твердим вуглецем не може реалізуватися у реальних умовах роботи відновних печей, незважаючи на їх термодинамічну можливість перебігу за реальних температур процесів у відновних печах.

Показано, що варіанти (2.1–2.4) реакції (2) навуглецьовання твердим вуглецем відновленого заліза до стану чавуну, незважаючи на термодинамічну можливість їх перебігу за реальних температур процесів, також не можуть відбуватися у відновних печах, оскільки за наявності надлишку вуглецю чисте залізо, що повинно навуглецьовуватися, не відновлюється.

На основі аналізу встановлено, що процеси відновлення з вюститу заліза і його науглецювання не є послідовними стадіями, а відбуваються одночасно як єдиний процес утворення з вюститу карбіду заліза під впливом твердого вуглецю за хімічною реакцією (3). Визначено, що серед усіх розглянутих її варіантів (3.1)–(3.4) термодинамічно і фізико-хімічно можливою в реальних умовах роботи відновних печей є тільки реакція (3.4). Вона відповідає процесу утворення рідкого чавуну безпосередньо з розплавленого вюститу, тобто лише при температурах, що перевищують температуру плавлення останнього.

Уточнено механізм процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту при застосуванні як відновника твердого вуглецю у будь-якій конструкції відновної печі, який відповідає законам термодинаміки і практичним аспектам виробництва рідкого чавуну.

З'ясування точного механізму відновлення з вюститу заліза з його науглецюванням до стану чавуну твердим вуглецем дозволяє сформулювати чітке уявлення про процес утворення рідкого чавуну (карбіду заліза) при прямому відновленні заліза із залізорудної сировини. Це, у свою чергу, дає змогу побудувати науково обґрунтовану фізико-хімічну модель, яка дасть чітке уявлення щодо процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту, що відбувається у промислових відновних печах із використанням як відновника твердого вуглецю.

Отримані результати також відіграють ключову роль у подальшому науковому обґрунтуванні та промисловій реалізації інноваційних технологій виробництва рідкої сталі в одну стадію безпосередньо із залізорудної сировини. Це створює перспективи суттєвого зростання продуктивності та ресурсозбереження сучасного сталеплавильного виробництва.

Перелік використаних джерел

- [1] Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. *Металлургия чугуна*. Київ: Вища школа, 1974. 288 с.
- [2] Смирнов В. О., Білецький В. С. *Фізичні та хімічні основи виробництва*. Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 148 с.
- [3] Morita K., Sano N. 3-Phase diagrams, phase transformations, and the prediction of metal properties. *Fundamentals of Metallurgy: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. 2005. Pp. 82–108. DOI: <https://doi.org/10.1002/chin.200618232>.
- [4] Літовченко П. І., Іванова Л. П. *Технологія конструкційних матеріалів*. Харків: НА НГУ, 2016. 306 с.
- [5] Поляков О. І., Гасик М. І. *Електрометалургія феросплавів, спеціальних сталей і сплавів*. Дніпропетровськ: Журфонд, 2009. 116 с.
- [6] Яцков М. В., Войцешевський Б. Д. *Хімія*. Рівне: НУВГП, 2015. 247 с.
- [7] Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом СО і газифікації твердого вуглецю за існуючими формулами і за стандартними значеннями ентальпії та ентропії речовин. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ, 2021. Вип. 2(39). С. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2>.
- [8] Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом СО і газифікації твердого вуглецю за мірами хімічної спорідненості речовин до кисню. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1(2). Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220102.1>.
- [9] Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання заліза газом СО при відновленні з вюститу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 49, т. 1. С. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243>.
- [10] Пантейков С. П., Романенко А. А., Бондаренко Я. І. Дослідження можливості перебігу процесу науглецювання заліза газом СО при відновленні з вюститу. *Наука і металургія: збірник тез Всеукраїнської науково-технічної конференції*, м. Дніпро, 19–20 листопада 2025. С. 56.
- [11] Демченко М. Т., Поважний С. Ф., Цибровський Г. Г. *Системи технологій*. Донецьк: ДонДАУ, 2001. 314 с.
- [12] Wang Z. Study of Iron Carburization in Co-Based Gas Mixtures : Ph.D. dissertation. Pennsylvania, USA : The Pennsylvania State University, 2007.
- [13] Мовчан В. П., Бережний М. М. *Основи металургії*. Дніпропетровськ: Пороги, 2001. 336 с.
- [14] Доменний процес / В.М. Ковшов та ін. Дніпропетровськ: Інститут Технології, 1998. 212 с.
- [15] Peacey J. G., Davenport W. G. *The Iron Blast Furnace: Theory and Practice*. Pergamon of Canada, Ontario : 1979. 266 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-023218-8.50005-4>.
- [16] Селегей А. М., Іващенко В. П., Безшкурченко О. Г. Аналіз сучасних теоретичних та технологічних методів і обладнання та перспектив розвитку завантаження доменних печей. *Теорія і практика металургії*. 2022. № 4(135). С. 30–45. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2022.05>.
- [17] Geerdes M., Toxopeus H., van der Vliet C. *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*. Amsterdam: IOS Press, 2009. 164 p.
- [18] Ковшов В. Н., Петренко В. А., Верещак В. И. Моделирование доменного процесса. *Днепропетровск: Институт технологии*, 1997. 109 с.
- [19] Денисюк Р. О. *Хімічна технологія*. Житомир: Видво ЖДУ ім. І. Франка, 2017. 350 с.

- [20] Determination of Direct Reduction Conditions of Mill Scale / Yucel O., Demirci F., Turan A., Alkan M. *High Temperature Materials and Processes*. 2013. Vol. 32(4). Pp. 405–412. DOI: <https://doi.org/10.1515/http-2012-0167>.
- [21] Reoxidation Behavior of the Direct Reduced Iron and Hot Briquetted Iron during Handling and Their Integration into Electric Arc Furnace Steelmaking: A Review / L. Kieush et al. *Metals*. Vol. 14(8). Article 873. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14080873>.
- [22] Research Progress of Iron Carburization in Blast Furnace / Zhang Z., Zhang J., Jiao K., Liu Z. *6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Springer, Cham, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48217-0_80.
- [23] Carbon Oxide Monoxide Reduction and Compacts Accompanying Swelling of Iron / Nasr M. I., Omar A. A., Hessien M. M. El-Geassy A.-A. *ISIJ International*. 1996. Vol. 36(2). Pp. 164–171. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.164>.
- [24] Iguchi Y., Endo S. Carburized carbon content of reduced iron and direct carburization in carbon composite iron ore pellets heated at elevated temperature. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44(12). Pp. 1991–1998. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1991>.
- [25] Гришин О. М., Надточій А. А. Вплив добавок заліза на кінетику відновлення оксиду хрому вуглецем і карбідами. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Т. 30(69), ч. 2, С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/05>.
- [26] Stability of Cementite Formed from Hematite and Titanomagnetite Ore / Longbottom R. J., Ostrovski O., Zhang J., Young D. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2007. Vol. 38. Pp. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-006-9005-2>.
- [27] Carbon deposition on iron surfaces in CO–CO₂ atmosphere / S. Geng et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015. Vol. 42(9). Pp. 714–720. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000049>.
- [28] Carbonising mechanism and carbon distribution behaviour during direct reduction in shaft furnace / Q. Lu et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 1999. Vol. 26(2). Pp. 122–126. DOI: <https://doi.org/10.1179/030192399677004>.
- [29] Kim D.-Y., Heo Y.-U., Sasaki Y. Cementite Formation from Magnetite under High Pressure Conditions. *ISIJ International*. 2013. Vol. 53(6). Pp. 950–957. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.950>.
- [30] Kazemi M., Sichen D. Effect of Experimental Conditions on Cementite Formation During Reduction of Iron Ore Pellets. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. Pp. 3519–3526. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0780-0>.
- [31] Reduction and Carburization Behaviors of Iron Oxide Composite with Iron Carbide and Free Carbon / Higashi R., Maruoka D., Iwami Yu., Murakami T. *ISIJ International*. 2024. Vol. 64(15). Pp. 2107–2114. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-271>.
- [32] Кириченко А. Г., Насекан Ю. П., Колесник Н. Ф. Влияние гранулометрического состава красного шлама на кинетику науглероживания. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. 2011. № 33. С. 7–11.
- [33] Можаренко Н. М., Параносенков А. А., Загоровская Н. М. Влияние параметров доменной плавки на процессы растворимости углерода в чугуне. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2005. Вып. 11. С. 21–26.
- [34] The carburization of iron oxide with carbon monoxide: Modifications of hägg iron carbide / E. M. Cohn et al. *Journal of Applied Chemistry*. 2007. Vol. 5(8). Pp. 418–425. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.5010050810>.
- [35] Murakami T., Fukuyama H., Nagata K. Mechanisms of Carburization and Melting of Iron by CO Gas. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41(5). Pp. 416–421. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.416>.
- [36] Hayashi S., Iguchi Y. Synthesis of Iron Carbide by Reaction of Iron Ores with H₂–CO Gas Mixtures Bearing Traces of Sulfur. *ISIJ International*. 1997. Vol. 37(1). Pp. 16–20. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.16>.
- [37] Hayashi S., Iguchi Y. Production of Iron Carbide from Iron Ores in a Fluidized Bed. *ISIJ International*. 1997. Vol. 38(10). Pp. 1053–1061. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.1053>.
- [38] Carburization of iron using CO–H₂ gas mixture / H.-S. Hwang et al. *Metals and Materials International*. 2004. Vol. 10. Pp. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03027366>.
- [39] Shin M., Oh J. S., Lee J. Carburization, Melting and Dripping of Iron through Coke Bed. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55(10). Pp. 2056–2063. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-115>.
- [40] Carbothermal reduction of mill scales formed on steel billets during continuous casting / S. M. E. Suarez et al. *Hyperfine Interactions*. 2021. Vol. 242. Article 29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10751-021-01769-9>.
- [41] До питання про безперервні та суміщені металургійні процеси / Губін Г. В., Скіндін І. Е., Саїтгареев Л. Н., Губін Г. Г. *Гірничий вісник*. 2022. Вип. 110. С. 168–171. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2022-1-110-168-172>.
- [42] Mirzajonova S., Esonova M. Corbotermic reduction processes components of from wastes of copper concentration plant. *Eurasian Journal of Academic*

- Research. 2025. Vol. 4(12 Special Issue). Pp. 712–715. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14899776>.
- [43] Acceleration of Carburization and Melting of Reduced Iron in Iron Ore–Carbon Composite Using Different Types of Carbonaceous Materials / T. Murakami et al. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57(11). Pp. 1928–1936. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-249>.
- [44] Юнес Р., Опрышко И. А., Лобода П. И. Анализ технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: Машинобудування. 2011. № 61. С. 184–192.
- [45] Out of C and CO, which is a better reducing agent at 673K? URL: <https://www.quora.com/Out-of-C-and-CO-which-is-a-better-reducing-agent-at-673K> (дата звернення: 15.12.2025 р.).
- [46] Пантейков С. П., Осташко О. М., Романенко А. А. Аналіз термодинамічних умов перебігу хімічних реакцій відновлення заліза з гематиту твердим вуглецем за літературними даними. *Молоді вчені 2024 – від теорії до практики: тези доповіді XIV Всеукраїнської конференції молодих вчених, м. Дніпро, 21 березня 2024 р.* С. 61–65.
- [47] Розрахунок термодинамічних температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту твердим вуглецем / Пантейков С. П., Романенко А. А., Бондаренко Я. І., Осташко О. М. *Збірник наукових праць ДДТУ: (тематичний випуск) «До 95-річчя кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова ДДТУ»*. Кам'янське: ДДТУ, 2024. С. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.5>.
- [48] Лобурець А. Т. Хімічна термодинаміка. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2016. 85 с.
- [49] Цветкова Л. Б. Фізична хімія: теорія і задачі. Львів: Магнолія, 2008. 415 с.
- [50] Солдаткіна Л.М. Хімічна термодинаміка в схемах, таблицях, формулах, рисунках. Одеса: «Одеський національний університет», 2012. 101 с.
- [51] Лебідь В.І. Фізична хімія. Харків: Фоліо, 2005. 478 с.
- [52] Пантейков С. П. О температурах протекания реакций восстановления железа из гематита твёрдым углеродом с позиций термодинамики. *Innovations technologies in science and practice: Proceedings of the VI-th International Scientific and Practical Conference, Haifa, Israel, February 15–18, 2022*. Pp. 531–541.
- [53] Пантейков С. П. О влиянии степени химического сродства веществ к кислороду на возможность протекания реакций восстановления железа из гематита твёрдым углеродом. *Theoretical and science bases of actual tasks: Proceedings of the XIV-th International Scientific and Practical Conference, Lisbon, Portugal, 12–15 April 2022*. Pp. 618–627.
- [54] Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз процесів відновлення заліза з вюститу твердим вуглецем. *Science, Technology and Global Challenges: Proceedings of 7-th International Scientific and Practical Conference, Tokyo, Japan, 05–07 March 2026*. Tokyo: CPN Publishing Group, 2026. Pp. 203–212.
- [55] Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз процесів науглецювання відновленого заліза твердим вуглецем. *Development of science in the XXI century: XXIV-th International Scientific and Practical Conference, Dortmund, Germany, 05–06 March, 2026*. 2026. Pp. 130–134.
- [56] Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз процесів науглецювання заліза при його відновленні з вюститу твердим вуглецем. *Current trends in the development of science and society: Abstracts of the X-th International Scientific and Practical Conference, Oslo, Norway, 10–13 March, 2026*. Pp. 184–192.
- [57] Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Київ: Либідь, 2002. 328 с.
- [58] Трапезніков О. П. Визначення параметрів лазерного опромінення тонких швидкорухомих заготовок та проектування оптичної системи. URL: https://mcic.kpi.ua/2019_3.htm (дата звернення: 15.03.2026 р.).
- [59] Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физикохимия и технология электроферросплавов. Днепропетровск: ГНПП «Системные технологии», 2005. 448 с.
- [60] Effects of Reducing Time on Metallization Degree of Carbothermic Reduction of Tall Pellets Bed / Xin J., Lin W., Ming-xu L., Feng-man S. *Journal of North-eastern University Natural Science*. 2016. Vol. 37(12). Pp. 1720–1725. DOI: <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2016.12.011>.
- [61] Chen Y. R., Zhang F. New Development in Decarburization Research and Its Application to Spring Steels. *High Temperature Corrosion of Materials*. 2023. Vol. 100(3-4). Pp. 109–143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11085-023-10181-3>.
- [62] Cornacchia G., Faccoli M., Roberti R. Metallurgical Investigation of a Steel Miner's Chisel From Ponte Val Gabbia III Site. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2015. Vol. 67. Pp. 260–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1219-1>.
- [63] Coproduction of DRI Powder and Semi-coke from Siderite Ore and Low Rank Coal by Excessive Coal-based Direct Reduction in Rotary Kiln / Ya. Luo et al. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56(1). Pp. 78–87. DOI: <http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-390>.
- [64] Bao S., Ringdalen E. Slag formation in silicon and ferrosilicon production using quartz, limestone and iron source. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2025. Vol. 32(4). Pp. 859–868. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3052-z>.

- [65] Чернега Д. Ф. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. Київ: Вища школа, 2006. 503 с.
- [66] Analysis on Ancient Bloomery Ironmaking Technology: The Earliest Ironmaking Evidence in the Central Plains of China Was Taken as the Research Object / Li S., Li Ya., Zhu R. Wang H. *Metals*. 2022. Vol. 12(8). Article 1307. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12081307>.
- [67] Пінчук С. І., Чигиринець О. Е. Хімія твердого тіла (короткий курс). Київ: Видавничий дім АртЕк, 2018. 124 с.
- [68] Пантейков С. П., Романенко А. А., Бондаренко Я. І. Термодинамічні дослідження процесу науглецювання заліза твердим вуглецем при відновленні з вюститу. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід: матеріали VIII Міжнародної конференції*, м. Дніпро, 20–24 грудня 2025 р. Дніпро: Журфонд, 2025. С. 133–136.
- [69] Ripan R., Ceteanu I. *Chimie anorganică. Volumul 2. Chimia metalelor*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1967. 806 p.
- [70] Стовба Я. В., Перескока В. В., Камкина Л. В. Оценка возможности использования железо- и марганецсодержащих отходов для получения углеродистого ферромарганца. *Сотрудничество для решения проблемы отходов: Материалы VI Международной конференции*, Харьков, 8–9 апреля 2009 г. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. С. 72–73.
- [71] Ali M.L., Fradet Q., Riedel U. Kinetic mechanism development for the direct reduction of single hematite pellets in H_2/CO atmospheres. *Steel Research International*. 2022. Vol. 93(12). Article 2200043. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202200043>.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE CONDITIONS FOR CARBURIZATION PROCESSES OF IRON BY SOLID CARBON DURING REDUCTION FROM WÜSTITE

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 ;
Romanenko A.A.	postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0188-1693 , e-mail: romandnepr@i.ua ;
Bondarenko Ya.I.	postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3165-7020 , e-mail: torironi@gmail.com ;
Lopushyn O.M.	master's student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1805-3921 , e-mail: olegnl@atlanticgeyser.com.ua

The article is devoted to the study of the carburization processes of iron during its reduction from wüstite. The work analyzes contemporary scientific approaches to explaining the mechanism of iron carburization during its reduction from wüstite by solid carbon. It is shown that the scientific literature and online sources offer different interpretations of this process: either as a sequence of two reactions (the reduction of Fe from FeO followed by the formation of Fe_3C from the reduced Fe) or as a single process of direct formation of iron carbide from wüstite. Some research groups associate iron carburization with the action of CO gas, solid carbon, or their combined participation. Based on the results of previous thermodynamic studies conducted by the authors, the impossibility of the reactions' course (both individual reactions and the overall reaction) for the reduction of iron from wüstite and its carburization by CO gas at temperatures typical of real metallurgical processes has been demonstrated. The aim of this work is to perform a thermodynamic analysis of the conditions governing the carburization processes of iron during its reduction from wüstite by solid carbon, considering both individual and combined chemical reactions describing these processes, as well as all possible combinations of the aggregate states of substances involved in the reactions. The methodology is based on calculating the temperature dependence of the Gibbs free energy change for the possible variants of these reactions, using derived equations based on the standard values of enthalpy and entropy of the substances, as well as their enthalpy and entropy of fusion. As a result of the thermodynamic analysis, it was established that none of the variants of the individual reactions of iron reduction from wüstite and the subsequent carburization of the formed iron can occur under the actual operating conditions of reduction furnaces. It was demonstrated that the processes of iron reduction and carburization do not occur as sequential stages but rather simultaneously as a single process of iron carbide formation. It was shown that the only thermodynamically and physicochemically feasible pathway is the direct formation of Fe_3C from wüstite in the presence of solid carbon at temperatures exceeding the melting point of FeO. The obtained results refine the mechanism of iron reduction from hematite when using solid carbon and thermodynamically substantiate that the final product of such a process is only high-carbon iron – pig iron. A correct understanding of this process allows the development of a scientifically grounded physicochemical model, which can be used for further research and the development of innovative technologies for the

direct production of steel from iron ore raw materials, with prospects for significantly increased efficiency and energy savings of modern steelmaking.

Keywords: reduction; carburization; chemical reaction; thermodynamic analysis; solid carbon; wüstite; iron carbide; Gibbs free energy; critical temperature; enthalpy; entropy; pig iron.

References

- [1] G. G. Efimenko, A. A. Gimmelfarb, and V. E. Levchenko, *Metallurgiya chuguna* [Cast iron metallurgy]. Kyiv: Vyshcha shkola Publ., 1974. (Rus.)
- [2] V. O. Smyrnov, and V. S. Biletskyi, *Fizychni ta khimichni osnovy vyrobnytstva. Navchalnyi posibnyk* [Physical and chemical foundations of production. Textbook]. Donetsk, Ukraine: Skhidnyi vydavnychiy dim Publ., 2005. (Ukr.)
- [3] K. Morita and N. Sano, "3-Phase diagrams, phase transformations, and the prediction of metal properties," in *Fundamentals of Metallurgy: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, pp. 82–108, 2005. doi: 10.1002/chin.200618232.
- [4] P. I. Litovchenko, and L. P. Ivanova, *Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv* [Technology of structural materials]. Kharkiv, Ukraine: NA NHU, 2016. (Ukr.)
- [5] O. I. Poliakov, and M. I. Hasyk, *Elektrometalurhiia ferosplaviv, spetsialnykh stalei i splaviv* [Electrometallurgy of ferroalloys, special steels and alloys]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Zhurfond Publ., 2009. (Ukr.)
- [6] M. V. Yatskov, and B. D. Voitsheshevskyi, *Khimiia* [Chemistry]. Rivne, Ukraine: NUVHP Publ., 2015. (Ukr.)
- [7] S. P. Panteikov, "Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za isnuichymy formulamy i za standartnyimi znachenniamy entalpii ta entropii rehovyn" ["Calculation of temperatures of chemical reactions in the process of stepwise reduction of iron from hematite with CO gas and gasification of solid carbon using existing formulas and standard values of enthalpy and entropy of substances"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky)* – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences), vol. 2(39), pp. 16–26, 2021. doi: 10.31319/2519-2884.39.2021.2. (Ukr.)
- [8] S. P. Panteikov, "Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rehovyn do kysniu" [Calculation of temperatures of chemical reactions in the process of stepwise reduction of iron from hematite with CO gas and gasification of solid carbon based on measures of chemical affinity of substances to oxygen], *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2022. doi: 10.46299/j.is-jea.20220102.1. (Ukr.)
- [9] S. P. Panteikov, "Termodynamichniy analiz umov perebihu khimichnykh reaktsii navuhletsuvannia zaliza hazom CO pry vidnovlenni z viustytu" ["Thermodynamic analysis of the conditions of the course of chemical reactions of iron carburization with CO gas during reduction from wüstite"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Tekhnichni nauky* – Reporter of the Pryazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences, vol. 49, no. 1, pp. 175–183, 2024. doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243. (Ukr.)
- [10] S. P. Panteikov, A. A. Romanenko, and Ya. I. Bondarenko, "Doslidzhennia mozhlyvosti perebihu protsesu navuhletsuvannia zaliza hazom CO pry vidnovlenni z viustytu" ["Investigation of the possibility of iron carburization by CO gas during reduction from wüstite"], in *Proc. of the Conference Proceedings of All-Ukrainian scientific and technical conference "Science and Metallurgy"*, Dnipro, Ukraine, November 19–20, 2025, p. 105. (Ukr.)
- [11] M. T. Demchenko, S. F. Povazhny, and H. H. Tsybrovskyi, *Systemy tekhnolohii* [Technology systems]. Donetsk, Ukraine: DonDAU Publ., 2001. (Ukr.)
- [12] Z. Wang, "Study of iron carburization in CO-based gas mixtures," Ph.D. dissertation, Dept. Energy and Geo-Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, 2007.
- [13] V. P. Movchan, and M. M. Berezhnyi, *Osnovy metalurhii* [Fundamentals of metallurgy]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Porohy Publ., 2001. (Ukr.)
- [14] V. M. Kovshov et al., *Domennyi protses* [Blast furnace process]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Instytut Tekhnolohii Publ., 1998. (Ukr.)
- [15] J. G. Peacey, and W. G. Davenport, *The Iron Blast Furnace: Theory and Practice*, Pergamon of Canada, Ontario, 1979. doi: 10.1016/B978-0-08-023218-8.50005-4.
- [16] A. M. Selehei, V. P. Ivashchenko, and O. H. Bezshkurenko, "Analiz suchasnykh teoretychnykh ta tekhnolohichnykh metodiv i obladnannia ta perspektyv rozvytku zavantazhennia domennykh pechei" ["Analysis of current theoretical and technological methods and development and prospects for the development of the importance of blast furnaces"], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, vol. 4, no. 135, pp. 30–45, 2022. doi: 10.34185/tpm.4.2022.05. (Ukr.)
- [17] M. Geerdes, H. Toxopeus, and C. van der Vliet, *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*. Amsterdam: IOS Press, 2009.
- [18] V. N. Kovshov, V. A. Petrenko, and V. I. Vereshchak, *Modelirovanie domennogo protsessa* [Modeling of the

- Blast Furnace Process]. Dnepropetrovsk, Ukraine: Institut tekhnologii Publ., 1997. (Rus.)
- [19] R. O. Denysiuk, *Khymichna tekhnolohiia* [Chemical technology]. Zhytomyr, Ukraine: Vyd-vo ZDU im. I. Franka, 2017. (Ukr.)
- [20] O. Yucel, F. Demirci, A. Turan, and M. Alkan, "Determination of Direct Reduction Conditions of Mill Scale," *High Temperature Materials and Processes*, vol. 32, no. 4, pp. 405–412, 2013. doi: [10.1515/htmp-2012-0167](#).
- [21] L. Kieush, S. Lesiak, J. Rieger, M. Leitner, L. Schmidt, and O. Dagheleh, "Reoxidation Behavior of the Direct Reduced Iron and Hot Briquetted Iron during Handling and Their Integration into Electric Arc Furnace Steelmaking: A Review," *Metals*, vol. 14, no. 8, article 873, 2024. doi: [10.3390/met14080873](#).
- [22] Zhang Z., Z. Zhang, J. Zhang, K. Jiao, and Z. Liu, "Research progress of iron carburization in blast furnace," in *6-th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Cham, Switzerland: Springer, 2015. doi: [10.1007/978-3-319-48217-0_80](#).
- [23] M. I. Nasr, A. A. Omar, M. M. El-Geassy, and A.-A. Hessien, "Carbon oxide monoxide reduction and compacts accompanying swelling of iron," *ISIJ Int.*, vol. 36, no. 2, pp. 164–171, 1996. doi: [10.2355/isijinternational.36.164](#).
- [24] Y. Iguchi and S. Endo, "Carburized carbon content of reduced iron and direct carburization in carbon composite iron ore pellets heated at elevated temperature," *ISIJ International*, vol. 44, no. 12, pp. 1991–1998, 2004. doi: [10.2355/isijinternational.44.1991](#).
- [25] O. M. Hryshyn, and A. A. Nadtochii, "Vplyv dobavok zaliza na kinetyku vidnovlennia oksydu khromu vuhletsem i karbidamy" ["The infusion of additives onto the kinetics of the renewal of chromium oxide with carbon and carbides"], *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 30, no. 69, part 2, no. 6, pp. 24–29, 2019. (Ukr.)
- [26] R. J. Longbottom, O. Ostrovski, J. Zhang, and D. Young, "Stability of Cementite Formed from Hematite and Titanomagnetite Ore," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 38, pp. 175–184, 2007. doi: [10.1007/s11663-006-9005-2](#).
- [27] S. Geng, W. Ding, S. Guo, X. Zou, Y. Zhang, and X. Lu, "Carbon deposition on iron surfaces in CO–CO₂ atmosphere," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 42, no. 9, pp. 714–720, 2015. doi: [10.1179/1743281215Y.0000000049](#).
- [28] Q. Lu, W. F. Jiang, C. X. Lu, L. G. Zhao, H. S. Yin, and J. F. Lang, "Carbonising mechanism and carbon distribution behaviour during direct reduction in shaft furnace," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 26, no. 2, pp. 122–126, 1999. doi: [10.1179/030192399677004](#).
- [29] D.-Y. Kim, Y.-U. Heo, and Y. Sasaki, "Cementite Formation from Magnetite under High Pressure Conditions," *ISIJ International*, vol. 53, no. 6, pp. 950–957, 2013. doi: [10.2355/isijinternational.53.950](#).
- [30] M. Kazemi and D. Sichen, "Effect of Experimental Conditions on Cementite Formation During Reduction of Iron Ore Pellets," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 47, pp. 3519–3526, 2016. doi: [10.1007/s11663-016-0780-0](#).
- [31] R. Higashi, D. Maruoka, Yu. Iwami, and T. Murakami, "Reduction and carburization behaviors of iron oxide composite with iron carbide and free carbon," *ISIJ International*, vol. 64, no. 15, pp. 2107–2114, 2024. doi: [10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-271](#).
- [32] A. G. Kyrychenko, Yu .P. Nasekan, and N. F. Kolesnik, "Vliyanie granulometricheskogo sostava krasnogo shlama na kinetiku nauglerozhivaniya" ["The influence of the granulometric composition of red mud on the kinetics of carburization"], *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Novye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Thematic issue: New solutions in modern technologies*, vol. 33, pp. 7–11, 2011. (Rus.)
- [33] N. M. Mozharensko, A. A. Paranosenkov, and N. M. Zagorovska, "Vliyanie parametrov domennoy plavki na protsessy rastvorimosti ugleroda v chugune" ["The influence of blast furnace smelting parameters on carbon solubility processes in cast iron"], in *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii – Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, vol. 11, pp. 21–26, 2005. (Rus.)
- [34] E. M. Cohn, E. H. Bean, M. Mentser, and L. J. E. Hofer, "The carburization of iron oxide with carbon monoxide: Modifications of Hägg iron carbide," *Journal of Applied Chemistry*, vol. 5, no. 8, pp. 418–425, 2007. doi: [10.1002/jctb.5010050810](#).
- [35] T. Murakami, H. Fukuyama, and K. Nagata, "Mechanisms of carburization and melting of iron by CO gas," *ISIJ International*, vol. 41, no. 5, pp. 416–421, 2001. doi: [10.2355/isijinternational.41.416](#).
- [36] S. Hayashi, and Y. Iguchi, "Synthesis of Iron Carbide by Reaction of Iron Ores with H₂–CO Gas Mixtures Bearing Traces of Sulfur," *ISIJ International*, vol. 37, no. 1, pp. 16–20, 1997. doi: [10.2355/isijinternational.37.16](#).
- [37] S. Hayashi, and Y. Iguchi, "Production of Iron Carbide from Iron Ores in a Fluidized Bed," *ISIJ International*, vol. 38, no. 10, pp. 1053–1061, 1997. doi: [10.2355/isijinternational.38.1053](#).
- [38] H.-S. Hwang, U.-C. Chung, W.-S. Chung, Y.-R. Cho, B.-H. Jung, and G. P. Martin, "Carburization of iron using CO–H₂ gas mixture," *Metals and Materials International*, vol. 10, pp. 77–82, 2004. doi: [10.1007/BF03027366](#).
- [39] M. Shin, J.S. Oh, and J. Lee, "Carburization, melting and dripping of iron through coke bed," *ISIJ*

- International*, vol. 55, no. 10, pp. 2056–2063, 2015. doi: 10.2355/isiinternational.ISIJINT-2015-115.
- [40] S. M. E. Suarez et al., “Carbothermal reduction of mill scales formed on steel billets during continuous casting,” *Hyperfine Interactions*, vol. 242, article 29, 2021. doi: 10.1007/s10751-021-01769-9.
- [41] H. V. Hubin, I. E. Skidin, L. N. Saitgareev, and G. H. Hubin, “Do pytannya pro bezperervni ta sumishcheni metalurhiyni protsesy” [“Before we talk about the uninterrupted and complex metallurgical processes”], *Hirnytskyi visnyk – Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, vol. 110, pp. 168–171, 2022. doi: 10.31721/2306-5435-2022-1-110-168-172. (Ukr.)
- [42] S. Mirzajonova, and M. Esonova, “Corbotermic reduction processes components of from wastes of copper concentration plant,” *Eurasian Journal of Academic Research*, vol. 4 no. 12 (Special Issue), pp. 712–715, 2025. doi: 10.5281/zenodo.14899776.
- [43] T. Murakami, M. Ohno, K. Suzuki, K. Owaki, and E. Kasai, “Acceleration of Carburization and Melting of Reduced Iron in Iron Ore–Carbon Composite Using Different Types of Carbonaceous Materials,” *ISIJ International*, vol. 57, no. 11, pp. 1928–1936, 2017. doi: 10.2355/isiinternational.ISIJINT-2017-249.
- [44] R. Yunes, I. A. Opryshko, and P. I. Loboda, “Analiz tekhnologii pryamogo vosstanovleniya oksidov metallov s primeneniem pechei s vrashchayushchimsya podom” [“Analysis of Direct Reduction Technologies for Metal Oxides Using Rotary Hearth Furnaces”], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». Seriya: Mashynobuduvannia – Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»*, vol. 61, pp. 184–192, 2011. (Rus.)
- [45] Out of C and CO, which is a better reducing agent at 673K? [Online]. Available: <https://www.quora.com/Out-of-C-and-CO-which-is-a-better-reducing-agent-at-673K>. Accessed on: December 15, 2026.
- [46] S. P. Panteikov, O. M. Ostashko, and A. A. Romanenko, “Analiz termodynamichnykh umov perebihu khimichnykh reaktsii vidnovlennia zaliza z hematytu tverdym vuhletsem za literaturnymy danymy [Analysis of thermodynamic conditions for chemical reactions of iron reduction from hematite with solid carbon based on literary data],” in *Proc. of the XIV All-Ukrainian Conf. of the young scientists «Young Scientists 2024 – from theory to practice»*, Dnipro, Ukraine, March 21, 2024, pp. 61–65. (Ukr.)
- [47] S. P. Panteikov, A. A. Romanenko, Ya. I. Bondarenko, and O. M. Ostashko, “Rozrakhunok termodynamichnykh temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu tverdym vuhletsem” [“Development of thermodynamic temperatures during chemical reactions in the process of step-by-step liquidation of hematite with solid carbon”], in *Zbirnyk naukovykh prats DDTU (tematychnyi vypusk): «Do 95-richchia kafedry metalurhii im. prof. V.I. Lohinova DDTU» – Collection of scientific papers of DSTU: (thematic issue) «To the 95th anniversary of the Department of Metallurgy named after Prof. V.I. Loginov, DSTU»*, pp. 53–62, 2024. doi: 10.31319/2519-2884.tm.2024.5. (Ukr.)
- [48] A. T. Loburets, *Khimichna termodynamika* [Chemical Thermodynamics]. Poltava, Ukraine: PNTU im. Yu. Kondratiuka Publ., 2016 (Ukr.).
- [49] L. B. Tsvetkova, *Fizychna khimiia: teoriia i zadachi* [Physical chemistry: theory and problems]. Lviv, Ukraine: Mahnoliia Publ., 2008 (Ukr.).
- [50] L. M. Soldatkina, *Khimichna termodynamika v skhemakh, tablytsiakh, formulakh, rysunkakh* [Chemical thermodynamics in diagrams, tables, formulas, figures]. Odesa, Ukraine: Odeskyi natsionalnyi universytet Publ., 2012 (Ukr.).
- [51] V. I. Lebid, *Fizychna khimiia* [Physical chemistry]. Kharkiv, Ukraine: Folio Publ., 2005 (Ukr.).
- [52] S. P. Panteikov, “O temperaturakh protekaniya reaktsii vosstanovleniya zheleza iz gematita tverdym uglerodom s pozitsii termodinamiki” [“On the temperatures of reactions of iron reduction from hematite by solid carbon from the standpoint of thermodynamics”], in *Proc. of the VI-th International Scientific and Practical Conference «Innovations technologies in science and practice»*, Haifa, Israel, February 15–18, 2022, pp. 531–541. doi: 10.46299/ISG.2022.I.VI. (Rus.).
- [53] S. P. Panteikov, “O vliyanii stepeni khimicheskogo srodstva veshchestv k kislorodu na vozmozhnost protekaniya reaktsii vosstanovleniya zheleza iz gematita tverdym uglerodom” [“On the influence of the degree of chemical affinity of substances to oxygen on the possibility of reactions of iron reduction from hematite with solid carbon”], in *Proc. of the XIV-th International Scientific and Practical Conference «Theoretical and science bases of actual tasks»*, Lisbon, Portugal, April 12–15, 2022, pp. 618–627. doi: 10.46299/ISG.2022.1.14. (Rus.).
- [54] S. P. Panteikov, “Termodynamichnyi analiz protsesiv vidnovlennia zaliza z viustytu tverdym vuhletsem” [“Thermodynamic analysis of the processes of iron reduction from wüstite with solid carbon”], in *Proc. of the 7-th International Scientific and Practical Conference «Science, Technology and Global Challenges»*, Tokyo, Japan, March 05–07, 2026, pp. 203–212. (Ukr.)
- [55] S. P. Panteikov, “Termodynamichnyi analiz protsesiv navuhletsuvannia vidnovlenoho zaliza tverdym vuhletsem” [“Thermodynamic analysis of the processes of carburizing reduced iron with solid carbon”], in *Proc. of the XXIV-th Int. Sci. and Pract. Conf. «Development of science in the XXI century»*, Dortmund, Germany, March 05–06, 2026, pp. 130–134. doi: 10.5281/zenodo.18960018. (Ukr.)
- [56] S. P. Panteikov, “Termodynamichnyi analiz protsesiv navuhletsuvannia zaliza pry yoho vidnovlenni z

- viustytyu tverdym vuhletsem” [“Thermodynamic analysis of iron carburization processes during its reduction from wüstite with solid carbon”], in *Abstracts of the X-th International Scientific and Practical Conference «Current trends in the development of science and society»*, Oslo, Norway, March 10–13, 2026, pp. 184–192. doi: 10.46299/ISG.2026.1.10. (Ukr.)
- [57] V. V. Khilchevskiy, *Materialoznavstvo i tekhnologhiia konstruktivnykh materialiv* [Materials science and technology of structural materials]. Kyiv, Ukraine: Lybid Publ., 2002. (Ukr.)
- [58] O. P. Trapeznikov, “Vyznachennya parametriv lazer-nogo oprominennya tonkykh shvydkorukhomykh zahotovok ta proektuvannya optichnoyi systemy” [“Determination of laser irradiation parameters of thin high-speed workpieces and design of the optical system”]. [Online]. Available: https://mcic.kpi.ua/2019_3.htm. Accessed on: December 15, 2026 (Ukr.).
- [59] M. I. Gasik and N. P. Lyakishev, *Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplovov* [Physicochemistry and technology of electroferroalloys]. Dnepropetrovsk, Ukraine: GNPP «Sistemnye tekhnologii» Publ., 2005. (Rus.)
- [60] J. Xin, W. Lin, L. Ming-xu, and S. Feng-man, “Effects of Reducing Time on Metallization Degree of Carbothermic Reduction of Tall Pellets Bed,” *Journal of Northeastern University Natural Science*, vol. 37, no. 12, pp. 1720–1725, 2016. doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2016.12.011.
- [61] Y. R. Chen, and F. Zhang, “New Development in Decarburization Research and Its Application to Spring Steels,” *High Temperature Corrosion of Materials*, vol. 100, no. 3-4, pp. 109–143, 2023. doi: 10.1007/s11085-023-10181-3.
- [62] G. Cornacchia, M. Faccoli, and R. Roberti, “Metallurgical Investigation of a Steel Miner’s Chisel From Ponte Val Gabbia III Site,” *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 67, pp. 260–271, 2015. doi: 10.1007/s11837-014-1219-1.
- [63] Ya. Luo, D. Zhu, X. Zhou, B. Shi, and F. Zhang, “Coproduct of DRI Powder and Semi-coke from Siderite Ore and Low Rank Coal by Excessive Coal-based Direct Reduction in Rotary Kiln,” *ISIJ International*, vol. 56, no. 1, pp. 78–87, 2016. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-390.
- [64] S. Bao, and E. Ringdalen, “Slag formation in silicon and ferrosilicon production using quartz, limestone and iron source,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 32(4), pp. 859–868, 2025. doi:10.1007/s12613-024-3052-z.
- [65] D. F. Cherneha, *Osnovy metalurhiynoho vyrobnytstva metaliv i splaviv* [Fundamentals of metallurgical production of metals and alloys]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 2006. (Ukr.)
- [66] S. Li, Ya. Li, R. Zhu, and H. Wang, “Analysis on ancient bloomery ironmaking technology: The earliest ironmaking evidence in the Central Plains of China was taken as the research object,” *Metals*, vol. 12, no. 8, article 1307, 2022. doi: 10.3390/met12081307.
- [67] S. I. Pinchuk and O. E. Chyhyrynets, *Khimiia tverdoho tila (korotkyi kurs)* [Solid State Chemistry (short course)]. Kyiv, Ukraine: Vydavnychiy dim ArtEk Publ., 2018. (Ukr.)
- [68] S. P. Panteikov, A. A. Romanenko, and Ya. I. Bondarenko, “Termodynamichni doslidzhennia protsesu navuhletsuvannia zaliza tverdym vuhletsem pry vidnovlenni z viustytyu” [“Thermodynamic studies of the process of carburizing iron with solid carbon during reduction from wüstite”], in *Proc. of the VIII Int. Conf. «Innovative technologies in science and education. European experience»*, Dnipro, Ukraine, December 20–24, 2025, pp. 133–136.
- [69] R. Ripan and I. Ceteanu, *Chimie anorganică. Volumul 2. Chimia metalelor* [Inorganic chemistry. Vol. 2. Chemistry of metals]. București, România: Editura Didactică și Pedagogică, 1967. (Rom.)
- [70] Ya. V. Stovba, V. V. Pereskoka, and L. V. Kamkina, “Otsenka vozmozhnosti ispolzovaniya zhelezo- i manganetsoderzhashchikh otkhodov dlya polucheniya uglerodistogo ferromangantsa” [“Evaluation of the possibility of using iron- and manganese-containing waste to produce carbonaceous ferromanganese”], in *Proc. of the VI Int. Conf. «Collaborating to solve waste problems»*, Kharkiv, Ukraine, April 8–9, 2009, pp. 72–73. (Rus.).
- [71] M. L. Ali, Q. Fradet, and U. Riedel, “Kinetic mechanism development for the direct reduction of single hematite pellets in H₂/CO atmospheres,” *Steel Research International*, vol. 93, no. 12, article 2200043, 2022. doi: 10.1002/srin.202200043.

Стаття надійшла 16.01.2026

Стаття прийнята 17.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Термодинамічний аналіз умов перебігу процесів навуглецювання заліза твердим вуглем при відновленні з вюститу / Пантейков С. П., Романенко А. А., Бондаренко Я. І., Лопушин О. М. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 243–257. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359813>.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДГРІВУ МЕТАЛОБРУХТУ В КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КУСКОВОГО ТА ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

Чернятевич А.Г.	д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4552-4997 , e-mail: agchern@ua.fm ;
Сігарьов Є.М.	д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8229-7877 , e-mail: siharovyevgen@gmail.com ;
Похвалітий А.А.	канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: ArtemMSLP@gmail.com ;
Кондрашенков Д.С.	здобувач третього (освітньо-наукового) ступеню, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6643-417X , e-mail: notfeilordima@gmail.com ;
Вовк А.О.	здобувач третього (освітньо-наукового) ступеню, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, e-mail: alyonkamaxvovk@gmail.com

Стаття присвячена дослідженню сучасних підходів до інтенсифікації теплової роботи кисневого конвертера шляхом використання альтернативних джерел енергії для попереднього підігріву металевих брухту. Проведено аналіз існуючих технологічних рішень нагрівання металевих заваляк в порожнині конвертера та розглянуто можливість підвищення ефективності цього процесу за рахунок використання твердих вуглецевмісних палив. У роботі виконано порівняльний аналіз теплотехнічних параметрів процесу нагрівання брухту при застосуванні традиційного кускового вугілля та пиловугільного палива. На основі теплотехнічних розрахунків визначено енергетичні витрати, необхідні для підвищення температури металевих заваляк до значень, що забезпечують інтенсифікацію плавлення брухту під час конвертерної плавки. Показано, що попередній підігрів металобрухту дає змогу підвищити частку брухту в металевій шихті та знизити витрати рідкого чавуну, що покращує енергоефективність сталеплавильного процесу та сприяє більш раціональному використанню енергетичних ресурсів. Досліджено вплив способу подачі палива на ефективність використання теплоти та повноту згоряння вуглецю. Проаналізовано зміну механізму нагрівання при переході від спалювання кускового вугілля до вдування пиловугільного палива через верхню паливно-фурму. Встановлено, що при використанні кускового вугілля процес горіння характеризується обмеженою площею реакційної поверхні та нерівномірним розподілом теплових потоків у шарі металобрухту. У свою чергу застосування пиловугільного палива забезпечує інтенсивніше згоряння завдяки високій дисперсності частинок палива, кращому змішуванню з окисником і більш рівномірному розподілу теплової енергії в робочому просторі конвертера. Отримані результати свідчать, що використання пиловугільного палива створює більш сприятливі умови для ефективного нагрівання металобрухту, забезпечує більш повне використання теплоти та сприяє підвищенню енергетичної ефективності процесу конвертерного виробництва сталі. Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при розробленні та впровадженні енергозберігаючих технологій попереднього підігріву металевих заваляк в промислових кисневих конвертерах.

Ключові слова: конвертер; кисень; кускове вугілля; пиловугільне паливо; паливно-киснева фурма; підігрів брухту; оксид вуглецю; високотемпературне моделювання.

Постановка проблеми

Підвищення частки металобрухту в шихті кисневих конвертерів є одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності та зниження вуглецевого сліду конвертерного виробництва сталі [1, 2]. Однак у традиційній технології кисневого продування вміст брухту обмежується тепловим балансом процесу, оскільки надлишкова кількість холодного металобрухту може призводити до заморозування металу, утворення твердих наростів на футерівці та порушення стабільності плавки.

Одним із шляхів розширення допустимої частки брухту є його попередній підігрів безпосередньо в порожнині конвертера перед заливкою рідкого чавуну. Такий підхід дозволяє підвищити теплонасиченість шихти та зменшити потребу в рідкому чавуні, проте супроводжується низкою технологічних обмежень. Існуючі методи попереднього підігріву металобрухту досліджуються, зокрема, із застосуванням чисельного моделювання процесів теплопередачі та горіння [3]. Разом із тим такі способи, як спалювання кускового вугілля на поверхні шихти або використання паливно-кисневих фурм, характеризуються нерівномірністю

нагрівання, підвищеними тепловими втратами та ризиком локального перегріву брукху і футерівки.

Нерозкритою проблемою є низька ефективність використання хімічної енергії палива при традиційному спалюванні кускового вугілля. Неповне згорання, утворення значної кількості оксиду вуглецю та відведення теплоти з газовою фазою зумовлюють підвищену витрату палива і кисню для досягнення заданого рівня нагріву. Це обмежує практичну доцільність широкого застосування такого способу в умовах сучасних конвертерів.

У зв'язку з цим актуальною є задача пошуку більш ефективних способів попереднього підігріву металобрукху, які забезпечували б інтенсивне і рівномірне теплопідведення за мінімальних витрат палива та кисню і без негативного впливу на футерівку. Перспективним напрямом є використання пиловугільного палива, що вдувається у кисневому струмені через верхню фурму, оскільки дрібнодисперсне паливо здатне швидко і повно згоряти з утворенням високотемпературного факела безпосередньо над поверхнею брукху.

Таким чином, науково-технічна проблема полягає у встановленні закономірностей теплової ефективності та механізму нагрівання металобрукху при різних способах підведення хімічної енергії палива в порожнині кисневого конвертера, а також у визначенні умов, за яких попередній підігрів забезпечує підвищення частки брукху без погіршення технологічної надійності процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблемі підвищення частки металобрукху в шихті кисневих конвертерів присвячено значну кількість наукових досліджень і технологічних розробок, а також дослідження складу металобрукху та його впливу на перебіг процесу плавки [4]. У більшості робіт зазначається, що традиційна технологія базисного кисневого продування обмежує вміст брукху на рівні ~20–25% через теплові обмеження процесу та ризик заморожування металу [5]. Для подолання цих обмежень було запропоновано як конструктивні, так і технологічні рішення.

Одним із перших напрямів стало вдосконалення конвертерних процесів за рахунок введення додаткових джерел теплоти. Зокрема, процеси типу К-ОВМ та КМС передбачали використання багатоярусних кисневих фурм, допалювання оксиду вуглецю над ванною або вдування твердого палива через донні пристрої [5]. Ці підходи дозволяли підвищити частку брукху до 35–40% [6], однак супроводжувалися зростанням тривалості плавки, витрат кисню та прискореним зносом футерівки, що обмежило їх подальше поширення.

Іншим напрямом стало попереднє підігрівання металобрукху безпосередньо в порожнині конвертера перед заливкою рідкого чавуну. Найпростішим рішенням є спалювання кускового твердого палива, розташованого на поверхні брукху, з подачею кисню через

верхню фурму [6]. Дослідження показали, що такий спосіб дозволяє скоротити дефіцит теплоти на початковій стадії плавки, проте характеризується нерівномірним нагріванням шихти, значними втратами теплоти з відхідними газами та високою ймовірністю локального перегріву верхніх шарів брукху.

Для підвищення рівномірності нагрівання були запропоновані паливно-кисневі пальники, встановлені у верхній частині конвертера або через сталевипускний отвір [8]. Такі рішення забезпечують більш стабільне теплопідведення, однак потребують тривалого часу нагрівання та призводять до інтенсивного теплового навантаження на футерівку. Крім того, при факельному нагріванні спостерігається значна частка теплоти, що витрачається на нагрів газової фази, а не металобрукху [7].

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені вдуванню газоподібного або твердого палива через донні продувні пристрої [8]. Хоча такий підхід дозволяє підводити теплоту безпосередньо в глибину шару брукху, його ефективність обмежується пропускною здатністю донних елементів і складністю забезпечення стабільного горіння, що знижує практичну реалізованість методу.

У більш нових роботах все більше уваги приділяється використанню пиловугільного палива, яке вдувається у струмені кисню через спеціальні фурми. Чисельні та експериментальні дослідження показують, що дрібнодисперсне паливо характеризується високою швидкістю займання і повнотою згорання, що сприяє інтенсивному випромінювальному теплообміну з металобрукхтом [9,10]. Повідомляється також про зменшення питомої витрати палива та кисню порівняно зі спалюванням кускового вугілля [10, 11]. Водночас більшість публікацій зосереджені на загальних енергетичних показниках і не приділяють достатньої уваги порівняльному аналізу механізмів нагрівання брукху при різних способах підведення палива в порожнині конвертера.

Таким чином, аналіз літературних і патентних джерел свідчить, що попри наявність численних рішень для підігріву металобрукху, питання ефективності використання хімічної енергії палива та впливу режимів подачі кисню на механізм нагрівання залишаються недостатньо вивченими. Це зумовлює доцільність проведення порівняльного дослідження традиційного спалювання кускового вугілля та вдування пиловугільного палива (ПВП) через верхню фурму в умовах кисневого конвертера.

Мета статті

Метою роботи є узагальнення, аналіз та порівняльна оцінка сучасних рішень попереднього підігріву металобрукху в порожнині кисневого конвертера, зокрема ефективності традиційного способу зі спалюванням кускового вугілля та перспективного способу з вдуванням пиловугільного палива через верхню фурму

з урахуванням особливостей теплопередачі й використання хімічної енергії палива.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процес попереднього підігріву металобрухту в порожнині кисневого конвертера перед заливкою рідкого чавуну. Дослідження виконано для умов типового базисного кисневого конвертера великої місткості, що працює за класичною схемою верхнього кисневого продування.

У роботі розглянуто два способи підведення хімічної енергії палива до шару металобрухту:

- спалювання кускового вугілля, розташованого на поверхні брухту, з подачею кисню через верхню фурму;

- вдування пиловугільного палива у струмені кисню через верхню фурму з формуванням високотемпературного факела над поверхнею шихти.

Порівняльна оцінка ефективності зазначених способів здійснювалася на основі теплового балансу процесу попереднього підігріву. Як основний критерій ефективності приймалася частка хімічної енергії палива, що передається металобрухту у вигляді корисної теплоти. При цьому враховувалися теплові потоки, пов'язані з конвективним та променевим теплообміном між факелом горіння, газовою фазою та поверхнею металобрухту.

Розрахунок теплового ефекту від згоряння палива проводився з використанням нижчої теплоти згоряння відповідних видів вуглецевого палива. При аналізі процесу горіння приймалося допущення про квазістаціонарний характер теплових процесів у період підігріву, а також про повне згоряння пиловугільного палива у струмені кисню. Для кускового вугілля враховувалася можливість неповного згоряння та відведення частини хімічної енергії з газовою фазою.

Теплові втрати з відхідними газами, а також теплове навантаження на футерівку оцінювалися за спрощеними інженерними залежностями, що дозволяє порівнювати відносну ефективність розглянутих способів без детального моделювання газодинаміки. Такий підхід є доцільним для встановлення загальних закономірностей підведення тепла до металобрухту та визначення напрямів підвищення ефективності попереднього підігріву в порожнині кисневого конвертера.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети використано комплексний підхід, що поєднує теоретичні розрахунки, аналіз літературних даних і узагальнення результатів лабораторних і дослідних випробувань.

Теоретичний розрахунок теплоспоживання. Вихідною задачею є оцінка кількості теплоти, необхідної для нагрівання металобрухту заданої маси з початкової до цільової температури за певний час. В якості модельного прикладу розглянуто нагрів 10 кг сталевго брухту від 20°C до 800°C за 5 хв (300 с).

Розрахунок проводиться за формулою теплового балансу:

$$Q = m \cdot c_{\text{cp}} \cdot (T_2 - T_1), \quad (1)$$

де m – маса брухту, c_{cp} – середня масова теплоємність сталі в заданому інтервалі температур, T_2 і T_1 – початкова і кінцева температура брухту відповідно. Для сталі приймаємо середню питому теплоємність в інтервалі 20–800°C приблизно 0,6 кДж/(кг·K) [10], враховуючи зростання теплоємності з температурою та ефект фазового перетворення Fe ($\alpha \rightarrow \gamma$) близько 727 °C. Підставляючи: $m = 10$ кг, $\Delta T = 780$ K, отримуємо:

$$Q \approx 10 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ кДж/(кг·K)} \cdot 780 \text{ K} \approx 4680 \text{ кДж}.$$

Отже, для нагрівання 10 кг брухту до 800°C необхідно близько 4,7 МДж теплоти. Цю енергію слід підвести за 5 хв, що відповідає середній тепловій потужності ~15,6 кВт. Такий рівень теплонаходження може бути забезпечений тільки інтенсивним екзотермічним реакційним джерелом тепла, зокрема, швидким згорянням вуглецевмісного палива безпосередньо в конвертері.

Розрахунок витрати палива та кисню. Як паливо розглядається енергетичне вугілля або інший вуглецевмісний матеріал, що здатен згоряти з киснем. Теоретична теплотворна здатність вуглецю при повному окисненні до CO₂ становить ~33,8 МДж/кг (реакція C+O₂=CO₂). В ідеальному випадку для отримання 4,68 МДж теплоти достатньо згоріти ~0,14 кг чистого C. Однак в реальних умовах частина вуглецю може згоряти не повністю (утворюючи CO замість CO₂ або залишаючись у вигляді недопалу), а частина виділеної теплової енергії не поглинається брухтом (йде на нагрівання газів, футерівки тощо). Для обліку цих втрат вводимо:

- Коефіцієнт повноти згорання $\eta_{\text{згор}}$: частка палива, що повністю вигорає до CO₂ (значення < 1 через утворення CO та втрати незгорілого коксу).

- Коефіцієнт використання теплоти $\eta_{\text{тепл}}$: частка теплової енергії згоряння, що передається брухту (решта розсіюється).

Ефективна частка теплоти, яка йде на нагрів брухту, оцінюється як $\eta_{\text{згор}} \cdot \eta_{\text{тепл}}$. За літературними даними, при традиційному способі з кусковим вугіллем ці коефіцієнти відносно невисокі. В реальних конвертерних плавках було зафіксовано, що фактична витрата O₂ на спалювання 1 кг вугілля становить 1,48–2,86 м³ при теоретично необхідних ~1,34 м³ і 2,67 м³ для CO та CO₂ відповідно [7]. Це означає, що значна частина кисню витрачається непродуктивно – або на неповне окиснення (до CO), або просто виходить із відхідними газами, не окислюючи паливо. Тобто коефіцієнт використання кисню і відповідно повноти згоряння вугілля може опускатися до ~0,47–0,90 (47–90%) у типових умовах спалювання кускового вугілля. Так само й теплота згоряння витрачається не повністю на брухт: за оцінками, не більше ~50–60% від

загального тепла реакції поглинається металобрухтом при спалюванні кускового палива.

Експериментальна база. Для аналізу особливостей процесу підігріву металобрухту були використані результати експериментальних досліджень, виконаних на багатофункціональній лабораторній високотемпературній установці (рис. 1а) [7, 12]. Макет конвертера (ємністю 80 кг металу) дозволяв відтворювати процес попереднього підігріву брухту перед заливкою чавуну. Внутрішній простір моделі футерувався вогнетривом та оснащувався змінними фурмами. Перед кожним дослідом футерівку моделі розігрівали до $\sim 800\text{--}850^\circ\text{C}$ згорянням малого завантаження коксу з повітродувкою через верхню фурму (імітація розігрітого промислового конвертера). Потім завантажували металобрухт (у різних дослідках використовували суміші легкого та важкого брухту, зменшені пропорційно до масштабу моделі шматки). Брухт займав частку об'єму, еквівалентну $\sim 30\%$ металофракції в промисловому 250-т конвертері.

Для моделювання способу з кусковим вугіллям певна кількість газового вугілля фракції 15–25 мм завантажувалася зверху на брухт (близько 70–80% усієї маси вугілля – на поверхню шару брухту, решта – частково в проміжки між брухтом і біля футерівки). Потім через верхню стандартну чотирисоплову кисневу фурму подавали технічно чистий O_2 з витратою, аналогічною до промислової інтенсивності, перерахованої на масштаб моделі (до $0,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ в перерахунку на умови моделі). Процес займання і горіння кускового вугілля фіксувався високошвидкісною відеокамерою, також проводився контроль температури поверхні брухту і футерівки пірометром [13].

Для реалізації способу з пиловугільним паливом використовувалася спеціальна паливно-киснева фурма «труба в трубі» (тръохсоплова) власної конструкції (рис. 1б). Центральними трубками-форсунками подавалося пиловугільне паливо, а кільцевим зазором навколо них – кисень [14]. ПВП вдували у потоці інертного газу або азоту (в різних дослідках використовували стиснене повітря або азот) для стабільного транспортування дрібного пилу. Витрата пилу становила $\sim 0,4\text{--}0,5 \text{ кг}/\text{хв}$, носій ($\text{N}_2/\text{повітря}$) – $\sim 0,15\text{--}0,20 \text{ м}^3/\text{хв}$, витрата O_2 – $\sim 0,25\text{--}0,39 \text{ м}^3/\text{хв}$. Ці параметри підбирали таким чином, щоб забезпечити стехіометричне або децю надстехіометричне співвідношення кисню і палива ($\approx 1\text{--}1,3$ від теорії). Займання пилу відбувалося безпосередньо у струмені: при виході факела з фурми суміш пилу з киснем самозаймалася від контакту з розігрітим середовищем, утворюючи яскраве полум'я над поверхнею брухту. Хід процесу також реєструвався відеокамерою та пірометрами.



Рис. 1 – Багатофункціональна установка високотемпературного моделювання процесу підігріву металобрухту перед заливанням рідкого чавуну (а) з використанням паливно-кисневої фурми (б): 1 – модель конвертера; 2 – верхня киснева (або паливно-киснева) фурма; 3 – паливні сопла; 4 – кисневі сопла; 5 – паливний живильник [7]

Розрахунок показав, що для нагріву 10 кг металобрухту на 780°C потрібно близько 4,7 МДж теплоти, тобто $\sim 0,14 \text{ кг}$ умовного вуглецю при ідеальному згорянні. Однак з урахуванням реальних умов кількість палива повинна бути більшою. В таблиці 1 узагальнено оцінки витрат палива і кисню для кускового та пиловугільного палива за розрахунковим прикладом, виходячи з коефіцієнтів $\eta_{\text{згор}}$ та $\eta_{\text{тепл}}$, що отримані з використанням експериментальних даних.

Таблиця 1
Оцінка витрат палива і кисню для нагріву 10 кг брухту ($20\text{--}800^\circ\text{C}$, 5 хв)

Показник	Кускове вугілля	Пиловугільне паливо (ПВП)
Потрібна теплота для нагріву брухту, МДж	4,7	4,7
Коефіцієнт повноти згорання, $\eta_{\text{згор}}$	0,70–0,90	0,97–0,995
Коефіцієнт використання теплоти, $\eta_{\text{тепл}}$	0,80	0,99
Ефективна частка теплоти, $\eta_{\text{згор}} \cdot \eta_{\text{тепл}}$	0,30–0,50	0,60–0,80
Необхідна теплота згорання палива, МДж	0,40	0,70
Маса палива, кг/10 кг брухту	0,21–0,45	0,58–0,80
Теоретична потреба O_2 , м^3	0,32	0,69
Фактична витрата O_2 з урахуванням надлишку, м^3	10,5–13,0	5,9–8,1
	11,7	6,8
	0,30–0,4	0,18–0,24
	0,35	0,2
	0,20–0,45	0,11–0,19
	0,28	0,15
	0,37–0,70	0,14–0,20
	0,65	0,17

З наведених оцінок видно суттєву різницю у вимогах до палива і кисню між двома методами. Кускове вугілля потребує майже вдвічі більше палива та кисню для досягнення того ж ступеня нагріву, через неповне згорання і втрати тепла. Дані практичних витрат кисню підтверджують це: при спалюванні кускового вугілля фактично витрачається $\sim 1,5\text{--}2,0 \text{ м}^3$

O₂ на 1 кг вугілля [15], тобто ~0,37–0,70 м³ O₂ на 0,35 кг (потрібних для 10 кг брукху), тоді як для ПВП достатньо ~1,35–1,5 м³ O₂ на 1 кг палива (~0,18–0,24 м³ на 0,2 кг).

Наведені дані є результатом порівняння лабораторних випробувань і свідчать про принципову перевагу способу з використанням ПВП. Останній дозволяє значно ефективніше використовувати хімічну енергію палива для нагріву брукху. Відповідно при масштабуванні на промислові умови можна очікувати зниження питомої витрати палива. Якщо для традиційного способу літературні джерела наводять витрати твердого палива ~11–21 кг на тону брукху [16], то при переході на пиловугільний спосіб цей показник може знизитися до ~8–15 кг/т брукху при тих самих умовах досягнення ~800°C. У відносних величинах це ~1–1,5% маси брукху. Необхідно відзначити, що фактична витрата кускового вугілля на деяких підприємствах України досягає 26–46 кг/т брукху. Орієнтовна витрата палива на нагрівання брукху до заданої температури представлена на рис. 2.

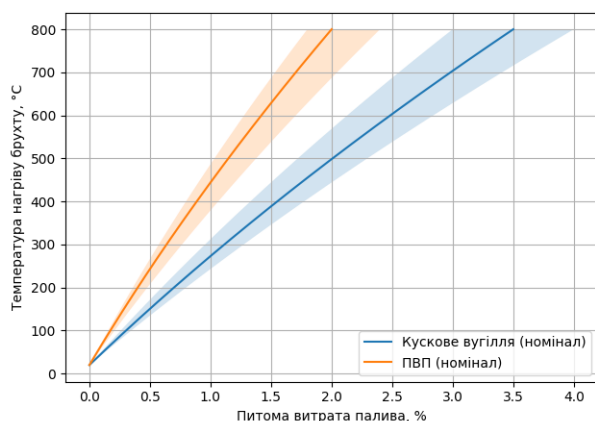


Рис. 2 – Графік орієнтовної витрати палива на нагрівання палива до заданої температури.

Отримана залежність демонструє системну перевагу ПВП над кусковим вугіллем за критерієм питомої витрати палива на заданий рівень нагріву брукху. Це узгоджується з фізикою процесу, оскільки при вдуванні ПВП паливо має вищий ступінь дисперсності та інтенсивніше змішується з окисником, що забезпечує більш повне і стабільне згорання у зоні, де тепловий потік максимально ефективно передається шихті. Для кускового вугілля характерне більш неоднорідне розташування палива у шарі, локалізація горіння та залежність від контакту з кисневими струменями; унаслідок цього зростає ймовірність неповного згорання та відведення частини теплоти з газами, що зумовлює більшу витрату палива для досягнення тієї самої температури брукху навіть у лабораторних умовах.

Кількісно графік підтверджує, що вже на помірних температурах різниця є суттєвою і

зберігається в усьому діапазоні. Для нагріву до 200°C питома витрата становить орієнтовно 0,60–0,80% для кускового вугілля (номінально 0,70%) і 0,36–0,48% для ПВП (номінально 0,40%). При 400°C витрата збільшується до 1,33–1,78% (номінально 1,55%) для кускового вугілля і 0,80–1,07% (номінально 0,89%) для ПВП. На рівні 600°C відповідно спостерігаються 2,13–2,83% (номінально 2,48%) і 1,28–1,70% (номінально 1,42%). У базовій точці 800°C інтервали складають 3,00–4,00% (номінально 3,50%) для кускового вугілля та 1,80–2,40% (номінально 2,00%) для ПВП. Отже, у межах 20–800°C перехід від кускового палива до ПВП зменшує питому витрату палива приблизно у 1,6–1,8 раза залежно від режиму, що коректно інтерпретується як результат більшої сумарної ефективності «згорання–теплопередача» при факельному спалюванні дрібнодисперсного палива.

Використання саме інтервальних коридорів є обґрунтованим для подання лабораторних результатів, оскільки навіть за однакових початкових умов повторюваність нагріву обмежується змінами фракційного складу палива, умов перемішування газового потоку, ступеня надлишку окисника та тепловтрат на стінки установки. Тому коридори на графіку слід розглядати як область імовірних значень питомої витрати, а номінальні криві — як репрезентативні траєкторії для узагальненого опису дослідних серій.

Аналіз впливу інтенсивності продувки киснем

Із розрахунків (див. вище) випливає, що існує мінімальний поріг подачі O₂, необхідний для ефективного спалювання заданої кількості палива за обмежений час. Якщо кисню подається менше цього порогу (як у випадку 0,05 м³/хв у нашому прикладі), процес горіння «задухається»: вугілля прогрівається і частково газифікується (виділяє леткі та СО), але значна його частка не встигає окиснитися до кінця. Це проявляється у *довгому індукційному періоді займання* та *неповному згоранні*. Експериментально при продувці киснем через 4-соплову фурму з помірною інтенсивністю (~0,2 м³/хв у моделі) спостерігалось, що приблизно через 20–30 с від початку подачі O₂ тільки починається інтенсивне виділення летких газів із поверхневих шматків вугілля. Ці газові продукти (C_mH_n) частково захоплюються в кисневій струмені, утворюючи локальні факели над брукхом. Первинне займання відбувається саме в зоні під фурмою, охоплюючи обмежену ділянку брукху. Далі фронт горіння поширюється по шару, але це займає час; поки вугілля на периферії займається, центральні зони вже частково прогорають і кисень починає пролітати далі. У результаті значна частина O₂ витрачається на «допалювання» газів уже над шаром брукху (відбившись від нього), фактично гріючи не метал, а газову фазу [17]. Отже, занадто низька інтенсивність продування O₂ призводить до розтягнутого у часі горіння з поетапним залученням палива; брукх нагрівається повільно і нерівномірно, причому верхні

шматки можуть вигоряти (окиснюватися), тоді як нижні не прогріються.

З іншого боку, збільшення інтенсивності продувки пришвидшує займання і поширення полум'я. У наших дослідках використання вдосконаленої двоярусної фурми (тобто збільшення подачі O_2 через додаткові сопла верхнього ярусу) дозволило залучити до горіння більший об'єм газових продуктів від палива. Спостерігалось утворення яскравих факелів від допалювання CO в кисневих струменях верхнього ярусу. Це свідчить, що при високій загальній подачі кисню (близькій до $0,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ у моделі) значна його частина витрачається на окиснення вже не вугілля, а проміжних продуктів (CO) і навіть Fe . Оскільки верхні струмені були далеко від брукхту, їх тепло майже не гріло метал, лише створювало гарячі гази (суміш CO_2/CO). Таким чином, надлишок O_2 також знижує ефективність – фактичний коефіцієнт використання кисню падає, частина енергії марнується. До того ж, при агресивних O_2 -струменях фіксувалися пошкодження і руйнування футерівки у точках, де струмінь відбивався від брукхту.

Оптимум, за експериментальними даними, лежить у такій області, де кисень подається з достатньою швидкістю для оперативного займання всіх часток палива, але не настільки надлищково, щоб значна його частина залишалась невикористаною. Для пиловугільного палива це досягається відносно легше, адже дрібні частки миттєво вступають в реакцію з O_2 . Вже на самому початку подачі ПВП спостерігалось утворення факела – суміш вугілля з киснем займалася одразу після виходу з сопла. При цьому, на відміну від кускового палива, леткі компоненти не встигають вивільнитися до займання частинки – вони згорають практично одночасно з твердим залишком. Це означає відсутність помітного індукційного періоду: пил горить у режимі близькому до кінетичного, відразу по всьому об'єму струменя. Візуально полум'я при горінні ПВП мало інтенсивно-світлий характер, порівняно з тьмяним червонуватим світом від кускового вугілля. Яскравість факела свідчить про високу температуру і випромінювальну здатність – що важливо для теплообміну із металом. Було встановлено, що коефіцієнти використання O_2 і палива при застосуванні ПВП значно вищі, ніж при кусковому за будь-якої тривалості нагрівання. Практично весь кисень реагує з паливом в зоні факела, а не поза нею, тому втрата O_2 в газову фазу мінімізується. Це узгоджується з цифрами: $1,0\text{--}1,35 \text{ м}^3 \text{ } O_2/\text{кг}$ ПВП проти $1,5\text{--}2,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ для кускового вугілля. Іншими словами, ефективність використання кисню зростає з $\sim 50\text{--}70\%$ до $\sim 90\text{--}100\%$. Паралельно зростає і частка теплоти, що переходить у брукхт: яскраве факельне горіння пилу інтенсивно нагріває поверхню брукхту випромінюванням і конвекцією, що скорочує час досягнення заданої температури поверхні. Експериментально підтверджено, що при використанні ПВП час, необхідний для прогрівання

брукхту до, скажімо, 800°C , скорочується настільки, що метал не встигає оплавитися. У випадку з кусковим паливом, навпаки, часто спостерігається плавлення верхніх шматків, бо для прогріву низів треба довше гріти верх – звідси локальний перегрів. При пиловому способі ж практично виключено утворення рідкої фази до заливки чавуну, адже прогрів проходить рівномірніше і швидше.

Таким чином, оптимальний режим продувки киснем у випадку пиловугільного палива – це подача, близька до стехіометричної, з високою швидкістю виходу струменя (сопла малого діаметру, щоб створити реактивний факел). Наші дослідження показують, що витрати $O_2 \sim 0,25\text{--}0,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ при подачі $\sim 0,4\text{--}0,5 \text{ кг}/\text{хв}$ ПВП є доцільними – при цьому досягається необхідна теплова потужність і повнота згорання без надлишку кисню. В перерахунку на тону брукхту, це відповідає витраті O_2 приблизно $18\text{--}24 \text{ м}^3/\text{т}$ і ПВП $14\text{--}20 \text{ кг}/\text{т}$ брукхту, що є прийнятними показниками. Звичайно, у промисловому процесі інтенсивність можна варіювати.

Процес горіння твердого палива відбувається у кілька стадій: (1) підігрів і сушіння палива, (2) піроліз (виділення летких C_mH_n і утворення коксового залишку), (3) згорання летких, (4) згорання коксового залишку. Для кускового вугілля ці стадії чітко розділені в часі і просторі. Спочатку полум'я прогріває поверхню шматків, випаровуючи вологу. Потім починається піроліз: з вугілля виходять газоподібні вуглеводні, які займаються в контакті з киснем – утворюються факели над частинками. На цьому етапі основне тепло дає горіння летких (полум'я над брукхтом). Далі вугілля переходить у коксовий залишок, який горить повільніше, переважно на поверхні контакту шматка з киснем. На завершальній стадії згорають останні порції коксу, даючи максимальне виділення тепла, але вже коли більшість летких вигорала. Внаслідок цього розподіл тепла нерівномірний: спочатку брукхт гріють факели летких – локально і короткочасно; потім довше горить розжарений кокс – він дає тепловипромінювання, але вже без сильного полум'я і лише в місцях розташування шматків вугілля. У наших дослідках з кусковим вугіллям було помітно, що горіння зосереджене спочатку під фурмою (де швидше нагрілося і запалилося паливо), а потім поширилося по шару брукхту, але осередками – навколо кожного шматка вугілля. Утворювались своєрідні «зони горіння», між якими метал залишався холоднішим. Локальна температура в зонах горіння могла перевищувати 1500°C , що призводило до оплавлення прилеглих шматків брукхту та інтенсивного інфрачервоного випромінювання (видимого як червоніння). Водночас ділянки брукхту, віддалені від палаючих шматків палива, нагрівалися лише за рахунок теплопровідності через метал і конвекції гарячих газів – тобто повільніше і на значно нижчу температуру. В результаті в кінці операції підігріву

спостерігався нерівномірний розподіл температур: верхні частини брукху місцями починали плавитися, тоді як глибинні шари могли лишатися нижче 400–500°C. Це підтверджували й промислові дані: в реальних конвертерах верхній шар брукху інколи оплавляється після 4–6 хв підігріву, а нижній нагрівається недостатньо, що змушує заливати чавун обережно, малими порціями, для уникнення викидів.

При переході до пиловугільного палива механізм змінюється докорінно. Дрібні частки (діаметр ~50–100 мкм) майже миттєво прогріваються до температури займання по всьому об'єму факела. Як зазначалося, піроліз і займання відбуваються практично одночасно, тому немає окремої фази вигорання летких – легкі компоненти згорають у міру виходу, одразу у полум'ї навколо частинки. Вуглецевий залишок (кокс) згоряє паралельно з леткими, причому з близькою швидкістю, оскільки маленький розмір частинок забезпечує величезну питому поверхню реакції. Утворюється суцільний факел із суміші газоподібних продуктів і згораючих твердих часточок – високотемпературний і дуже яскравий. Цей факел охоплює весь проєкційний майданчик струменя на брукхті. У наших експериментах камера зафіксувала, що факел від ПВП вкривав більшу площу поверхні брукху, ніж окремі факели від кускового палива. Це означає, що тепловий потік до металу розподіляється більш рівномірно. Випромінювання від факела з ПВП надзвичайно інтенсивне (температура полум'я оцінювалася >2000 °C), що сприяє швидкому підвищенню температури відкритої поверхні брукху. Конвективна передача тепла теж ефективна – дрібні гарячі продукти згорання проникають у проміжки між шматками брукху, прогріваючи глибші шари. Загальний механізм нагрівання стає ближчим до об'ємного: замість кількох локальних зон горіння маємо факел, що «накриває» увесь брукхт зверху, плюс гарячі гази, що просочуються вниз. Тому брукхт прогрівається відразу по всьому об'єму більш рівномірно. Пірометром було зафіксовано, що різниця температур між верхніми та нижніми фрагментами брукху при використанні ПВП значно менша, ніж при кусковому паливі (наприклад, 800°C зверху і ~600°C внизу проти 900°C і 300–400°C відповідно). Жоден із шматків брукху не досяг температури плавлення (понад ~1200°C) за час підігріву пилом – натомість усі вони нагрілися до проміжного рівня без фазових перетворень. Це підтвердило основну перевагу: пилове паливо прогріває металобрукхт рівномірно, виключаючи локальний перегрів і передчасне плавлення.

Слід зазначити, що більш рівномірний нагрів брукху позитивно впливає і на збереження футерівки. При кусковому паливі спостерігалися випадки, коли перегріті струмені O₂ (особливо відбившись від холодного брукху) спрямовувалися на стінки конвертера, викликаючи часткове руйнування. У разі пилового факела кисень практично весь прореагував з пилом у факелі, тому до стінок доходять вже продукти

згорання (CO₂, N₂, H₂O) з помірною температурою, які не спричиняють інтенсивного окиснення вогнетриву. Тобто пиловугільна технологія потенційно менш агресивна для футерівки конвертера. До того ж, рівномірний підігрів усуває небезпечну ситуацію, коли при заливці чавуну частина брукху залишається переохолодженою – це знижує ризик «вибухових» викидів металу. Отже, перехід від кускового палива до пиловугільного не лише підвищує енергоефективність, а й покращує технологічну безпеку процесу.

Оптимальні режими подачі пиловугільного палива

На основі проведених досліджень та аналізу літератури можна рекомендувати наступні режими використання ПВП для попереднього підігріву металобрукху в конвертерах. По-перше, як вже вказано, співвідношення кисень : паливо повинно бути близьким до стехіометричного. Експерименти показали ефективність діапазону 1,0–1,35 м³ O₂ на 1 кг пилового вугілля – при цьому досягається повне вигорання без лишку кисню і факел має максимальну температуру без «холодних» зон. У практичному плані це означає: знаючи планову масу ПВП для підігріву, слід подавати кисень із розрахунку ~8–12 м³ O₂ на кожні 10 кг ПВП. Наприклад, якщо подається 100 кг пилу, то кисню потрібно ~80–120 м³ (н.у.) протягом операції підігріву.

По-друге, рекомендується плавно змінювати витрату ПВП протягом підігріву. Спочатку – менша витрата для надійного займання (бо занадто велика кількість пилу на старті може не встигнути згоріти і частково винестись незайнятою). Потім, коли факел стабілізувався, витрату збільшують для інтенсивного нагріву основної маси брукху. Під кінець підігріву, коли брукхт вже гарячий, можна знову знизити подачу палива, щоб уникнути перегріву поверхні. Такий алгоритм добре узгоджується з даними патенту № 125045 UA: автори виділяють три стадії – перші 25% часу подача 0,4–0,5% маси брукху в хвилину, наступні 25% часу – 1,0–2,0% маси, решта 50% часу – ≥2,5% маси брукху. Іншими словами, якщо брукху 10 т, то в першу хвилину подають ~40–50 кг пилу, у другу – до 100 кг, а в останні кілька хвилин – по 125 кг/хв або більше. Така висока інтенсивність наприкінці дозволяє максимально швидко довести температуру брукху до цільової, коли він вже частково розігрітий і може поглинути більше тепла без ризику локального плавлення. На практиці надто високі витрати пилу обмежені лише пропускну здатністю фурм і можливістю видалення продуктів згорання – в конвертері об'ємом 250 т реальні витрати ПВП становлять, ймовірно, до 300–500 кг/хв, виходячи з аналогії з витратами природного газу (10–20 нм³/т або ~200–400 м³/хв загалом). Наш лабораторний режим 0,5 кг/хв на 80 кг модель відповідає ~150 кг/хв на 24 т брукху (30% від 80 т розплаву), або ~500 кг/хв на 250 т конвертер – цілком досяжна величина при застосуванні декількох фурм. Таким чином,

масштабування пиловугільного підігріву до промислових BOF є технічно реальним.

Щодо загальної витрати пиловугільного палива, орієнтовні оцінки наведені вище: близько 10–20 кг ПВП на 1 т підігріваного брухту, щоб підняти його температуру на $\sim 700\text{--}800^\circ\text{C}$. Точна кількість залежатиме від початкової температури брухту (взимку холодний брухт потребує більше тепла), від складу брухту (наявність оксидів, фарби – витрати теплоти на їх нагрів/розклад), а також від вимог до кінцевої температури. Якщо достатньо нагріти брухт до $\sim 500\text{--}600^\circ\text{C}$, то витрати палива зменшуються приблизно вдвічі (недонагрів $\sim 200^\circ\text{C}$ економить $\sim 25\text{--}30\%$ енергії, плюс менше втрат тепла випромінюванням при нижчій температурі). У ряді випадків метою є не максимально можливий прогрів, а лише усунення вологості та полегшення початкового плавлення – тоді витрата ПВП може бути мінімальною (5–10 кг/т). З іншого боку, для досягнення близьких до плавлення температур ($\sim 1000^\circ\text{C}$ і більше) потрібно більше палива – можливо до 30 кг/т. Тож на практиці очікуваний діапазон витрат пиловугільного палива складає порядку 0,5–3% від маси брухту, залежно від необхідної ступеня нагріву.

Важливо також забезпечити оптимальну дисперсність пилу: занадто грубий пил (наприклад $> 0,2$ мм) може встигати долітати до поверхні брухту і там горіти як дрібні «куски», що трохи знижує рівномірність; надто дрібний пил ($< 0,01$ мм) може заноситися газовим потоком і частково вигорати уже над брухтом, не додаючи тепла металу. Досвід показує, що фракція 0,05–0,1 мм є оптимальною для конвертерних умов – такий пил достатньо реакційноспроможний, але й досить інерційний, щоб проникати між шматками шихти.

Результати та їх обговорення

Отримані результати підтверджують, що технологія попереднього підігріву металобрухту із вдуванням пиловугільного палива є ефективнішою за традиційну з кусковим паливом. Вона забезпечує повніше використання енергії палива, рівномірний нагрів без локального перегріву і менший знос футерівки. Очікується, що впровадження паливно-кисневих фурм у промислових конвертерах дозволить підвищити частку брухту в шихті (потенційно до 30–40% і більше) без погіршення техніко-економічних показників плавки. Для повної реалізації технології потрібні додаткові дослідження на промислових агрегатах, зокрема оптимізація конструкції фурм (охолодження, захист від забивання пилом) та автоматизація керування подачею палива і кисню. Також слід приділити увагу екологічним аспектам – очищенню відхідних газів від дрібного недопалу та пилу, що потенційно може винестися з конвертера при інтенсивному дутті. Результати роботи свідчать про перспективність впровадження ПВП-технології для підігріву брухту задля підвищення

ефективності та гнучкості конвертерного виробництва сталі.

Висновки

1. Сучасні технології підігріву металобрухту зосереджені на компенсації дефіциту теплоти в конвертері при підвищених рівнях брухту. Традиційний спосіб – спалювання кускового вугілля на брухті – обмежує частку брухту $\sim 25\text{--}30\%$ через нерівномірність нагріву та технологічні труднощі. Спеціальні процеси (K-OBM, KMS тощо) історично дозволили збільшити скрап-коефіцієнт до $\sim 40\%$ завдяки подачі додаткового палива і кисню, проте не набули широкого поширення через складність і знос обладнання.

2. Розрахунок енергетичних витрат показує, що для нагрівання 1 т брухту на $\sim 800^\circ\text{C}$ потрібно $\sim (0,4\text{--}0,5) \cdot 10^8$ кДж теплоти (в залежності від теплоємності та втрат), що еквівалентно $\sim 12\text{--}15$ кг вугілля при повному згорянні. На практиці через неповне згоряння палива та тепловтрати витрати вищі. При спалюванні кускового вугілля у конвертері витрата палива сягає 11–21 кг/т брухту, а кисню – $36\text{--}48$ $\text{нм}^3/\text{т}$ брухту [16]. Це відповідає коефіцієнту використання теплоти на рівні $\sim 50\%$. Застосування пиловугільного палива підвищує ефективність: за рахунок повнішого вигорання і інтенсивнішого теплообміну очікувана витрата палива складає $\sim 8\text{--}15$ кг/т брухту, кисню – $30\text{--}35$ $\text{нм}^3/\text{т}$ (економія $\sim 20\text{--}30\%$).

3. Пиловугільне паливо має переваги у горінні. Дисперсні частки вугілля ($\sim 0,05$ мм) займаються в кисневому струмені практично миттєво, причому леткі компоненти згоряють одночасно з твердим залишком. Утворюється суцільний високотемпературний факел великої світимості, який рівномірно прогріває брухт випромінюванням і гарячими продуктами згоряння. На відміну від цього, кускове вугілля горить поетапно: спочатку виділяються і згоряють леткі з утворенням локальних факелів, потім тліє коксовий залишок. Це призводить до нерівномірного нагріву – лише навколо окремих шматків палива, з ризиком перегріву верхніх шарів брухту та недостатнього прогріву нижніх.

4. Ефективність використання кисню і теплоти з застосуванням ПВП значно вища. Експериментально встановлено, що при питомій витраті $\text{O}_2 \sim 1,0\text{--}1,3$ $\text{м}^3/\text{кг}$ ПВП забезпечується повне згоряння палива та рівномірний прогрів брухту без оплавлення. Для кускового палива витрати кисню становлять $1,5\text{--}2,8$ $\text{м}^3/\text{кг}$, тобто значна частина O_2 не використовується неефективно. Коефіцієнт використання кисню і палива при пиловугільному підігріві вищий на 20–30% порівняно з традиційним, що підтверджується яскравішим факелом і швидшим нагрівом брухту.

5. Інтенсивність кисневої продувки критично впливає на процес. Надто мала витрата O_2 призводить до затримки займання і неповного вигорання палива, а занадто велика – до непродуктивного допалювання кисню поза зоною брухту та підвищеного окиснення

футерівки. Оптимальний режим – близький до стехіометричного. Рекомендовано подавати кисень з витратою, що забезпечує повне окиснення палива протягом тривалості підігріву, але не більше. Для пилового палива це $\sim 0,25\text{--}0,40\text{ м}^3/\text{хв}$ на одну фурму (або $\sim 8\text{--}12\text{ нм}^3/\text{кг}$ палива).

6. Розроблено рекомендації щодо режиму подачі ПВП. Доцільно здійснювати подачу палива в три стадії: на початку – низька витрата ($\sim 0,4\text{--}0,5\%$ маси брукху за перші $\sim 25\%$ часу) для забезпечення стабільного займання, в середині – підвищена ($\sim 1\text{--}2\%$ за наступні 25% часу) для інтенсивного прогріву, і на кінцевій стадії – максимальна ($\geq 2,5\%$ маси брукху за другу половину часу) для доведення брукху до потрібної температури. Такий режим забезпечує ефективне використання палива: паливо встигає повністю згоріти і віддати тепло, не викликаючи перевитрат кисню.

7. Огляд літературних і патентних джерел показав активний інтерес до тематики підігріву брукху. Ряд патентів пропонує вдосконалення технології: перехресні потоки кисню і палива, додавання карбонатних сполук для зв'язування оксидів під час підігріву, використання відновлювальних біопалив з високим вмістом фіксованого вуглецю, імпульсний та поетапний режими введення палива тощо. Це підкреслює актуальність проблеми і підтверджує наші результати про переваги керованого, рівномірного теплонадходження. Наукові публікації останніх років фіксують успішні лабораторні і напівпромислові випробування паливно-кисневих фурм з ПВП, які продемонстрували скорочення часу підігріву та кращий тепловий стан брукху.

8. Рівномірний попередній підігрів металобрукху сприяє стабілізації температурного стану металевий ванни на початкових етапах плавки, що може впливати на формування окиснювального стану металу перед випуском та ефективність подальших операцій розкислення сталі.

Перелік використаних джерел

- [1] Cayir E., Egriçan N. Optimization of energy consumption in integrated blast furnace and BOF steelmaking process. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, Turkey, 12–14 July 2010. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24024>.
- [2] Contribution of CO₂ emissions from basic oxygen steelmaking process / Madhavan N., Brooks G., Rhamdhani M. A., Bordignon A. *Metals*. 2022. Vol. 12, № 5. Article 797. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12050797>.
- [3] Comparative study of heat transfer simulation and effects of different scrap steel preheating methods / P. Xiao et al. *Metals*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 913. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14080913>.
- [4] Zhou Y., Naert K., Nuyens D. Modeling scrap composition in electric arc and basic oxygen furnaces. arXiv preprint. arXiv:2504.09382. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09382>.
- [5] Lytvyniuk Y., Van den Berg B., Skorians M. Increased scrap utilization in the converter steelmaking. *9th European Oxygen Steelmaking Conference (EOSC)*, Aachen, Germany, 17–21 Oct. 2022.
- [6] Potential for increased scrap melting in a BOF / N. Madhavan et al. *AISTech*, 2022: Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference, Pittsburgh, USA, 16–18 May 2022. Pp. 441–449. DOI: <https://doi.org/10.33313/386/050>.
- [7] Використання пиловугільного палива для попереднього підігріву металобрукху / А. Г. Чернятевич та ін. // *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. С. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.11>.
- [8] Deloche D., Brotzmann K. Method for an improved energy input into a scrap bulk: пат. US 6030431 A США. № US 08/973221; заявл. 11.06.1996; опубл. 29.02.2000.
- [9] Influence of oxy-fuel lance parameters on the scrap pre-heating temperature in the hot metal ladle / S. Zhuang et al. *Metals*. 2023. Vol. 13, № 5. Article 847. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050847>.
- [10] Kikuchi N. Development and prospects of refining techniques in steelmaking process. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60, № 12. Pp. 2700–2712. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-186>.
- [11] Спосіб виплавки залізовуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері : пат. 125045 Україна. № а201910881 ; заявл. 04.11.2019 ; опубл. 27.05.2021.
- [12] High-temperature modeling of hot metal tapping from the converter with argon supply to the tap hole cavity / A. A. Pohvalityi et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. № 5. Pp. 46–50.
- [13] Відеофіксація фізико-хімічних процесів в порожнині конвертера під час нагріву металевий брукху / А. Г. Чернятевич та ін. *Литво. Металургія*. 2024 : матеріали XX Міжнародної наук.-практ. конф., м. Дніпро, 28–30 травня 2024 р. С. 507–511.
- [14] Особливості визначення конструкції наконечників кисневих фурм в нестационарних умовах конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрукху / А. А. Похвалітий та ін. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2021. Вип. 2(39). С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.3>.
- [15] Modeling results for the preheating of scrap by means of coal pieces in a converter / R. F. Nagumanov et al. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41, № 4. Pp. 301–306. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091211040176>.
- [16] Спосіб виплавки сталі в конвертері: пат. 2461 Україна: МПК C21C 5/28. № 4943628; заявл. 21.06.1991; опубл. 26.12.1994. 3 с.
- [17] Сігарьов Є. М., Лобанов Ю. С., Похвалітий А. А. Дослідження впливу конструкції наконечника

фурми на показники конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного*

університету (технічні науки). 2021. Вип. 1(38). С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.38.2021.4>.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SCRAP METAL PREHEATING IN AN OXYGEN CONVERTER USING LUMP COAL AND PULVERIZED COAL FUEL

Chernyatevych A.G.	D.Sc. (Engineering), professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4552-4997 , e-mail: agchern@ua.fm ;
Siharov E.M.	D.Sc. (Engineering), professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8229-7877 , e-mail: siharovyevgen@gmail.com ;
Pokvalitii A.A.	PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: ArtemMSLP@gmail.com ;
Kondrashenkov D.S.	Postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6643-417X , e-mail: notfeilordima@gmail.com ;
Vovk A.O.	Postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, e-mail: alyonkamaxvovk@gmail.com

The article is devoted to the study of modern approaches to intensifying the thermal performance of an oxygen converter through the use of alternative energy sources for the preliminary heating of metal scrap. An analysis of existing technological solutions for heating the metallic charge in the converter cavity was carried out, and the possibilities of increasing the efficiency of this process through the use of solid carbon-containing fuels were considered. A comparative analysis of the thermal parameters of the scrap heating process when using traditional lump coal and pulverized coal fuel was performed. Based on thermotechnical calculations, the energy consumption required to increase the temperature of the metallic charge to values that ensure intensification of scrap melting during converter steelmaking was determined. It is shown that preliminary heating of scrap makes it possible to increase the share of scrap in the metallic charge and reduce the consumption of hot metal, which improves the energy efficiency of the steelmaking process and promotes more rational use of energy resources. The influence of the fuel supply method on heat utilization efficiency and the completeness of carbon combustion was also investigated. The change in the heating mechanism during the transition from burning lump coal to blowing pulverised coal fuel through the top oxy-fuel lance was analysed. It was established that when lump coal is used, the combustion process is characterized by a limited reaction surface area and an uneven distribution of heat flows within the scrap layer. In contrast, the use of pulverized coal fuel provides more intensive combustion due to the high dispersion of fuel particles, better mixing with the oxidizer, and a more uniform distribution of thermal energy in the working space of the converter. The obtained results indicate that the use of pulverized coal fuel creates more favorable conditions for efficient heating of scrap metal, ensures more complete utilization of heat, and contributes to increasing the overall energy efficiency of the converter steelmaking process. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results in the development and implementation of energy-saving technologies for preliminary heating of the metallic charge in industrial oxygen converters.

Keywords: converter; oxygen; lump coa; pulverized coal fuel; fuel-oxygen lance; scrap preheating; carbon monoxide; high-temperature modeling.

References

- [1] E. Cayir and N. Egrican, "Optimization of energy consumption in integrated blast furnace and BOF steelmaking process," in *Proc. ASME 10th Biennial Conf. Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, Turkey, July 12–14, 2010. doi: [10.1115/ESDA2010-24024](https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24024).
- [2] N. Madhavan, G. Brooks, M. A. Rhamdhani, and A. Bordignon, "Contribution of CO₂ emissions from basic oxygen steelmaking process," *Metals*, vol. 12, no. 5, article 797, 2022. doi: [10.3390/met12050797](https://doi.org/10.3390/met12050797).
- [3] P. Xiao, Y. Jin, L. Zhu, C. Wang, and R. Zhu, "Comparative study of heat transfer simulation and effects of different scrap steel preheating methods," *Metals*, vol. 14, no. 8, article 913, 2024. doi: [10.3390/met14080913](https://doi.org/10.3390/met14080913).
- [4] Y. Zhou, K. Naert, and D. Nuyens, "Modeling scrap composition in electric arc and basic oxygen furnaces," 2025, *arXiv:2504.09382*. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09382>.
- [5] Y. Lytvyniuk, B. Van den Berg, and M. Skoriansz, "Increased scrap utilization in the converter steelmaking,"

- in *Proc. 9th European Oxygen Steelmaking Conf. (EOSC)*, Aachen, Germany, Oct. 17–21, 2022.
- [6] N. Madhavan, G. A. Brooks, M. A. Rhamdhani, B. K. Rout, and A. Overbosch, "Potential for increased scrap melting in a BOF," in *Proc. AISTech 2022: Iron and Steel Technology Conf.*, Pittsburgh, PA, USA, May 16–18, 2022, pp. 441–449. doi: **10.33313/386/050**.
- [7] A. H. Cherniatevych, A. A. Pokhvalityi, Ye. M. Sihariov, O. A. Chubina, and D. S. Kondrashenkov, "Vykorystannia pylovuhilnoho palyva dlia poperednoho pidihrivu metalobrukhtu" ["Use of pulverized coal fuel for preheating metal scrap"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, pp. 123–131, 2024. doi: **10.31319/2519-2884.tm.2024.11**. (Ukr.)
- [8] D. Deloche, and K. Brotzmann, "Method for an improved energy input into a scrap bulk," *U.S. Patent Appl. 6030431A*, Feb. 29, 2000.
- [9] S. Zhuang, D. Zhan, T. Wang, P. Li, and Y. Yang, "Influence of oxy-fuel lance parameters on the scrap pre-heating temperature in the hot metal ladle," *Metals*, vol. 13, no. 5, article 847, 2023. doi: **10.3390/met13050847**.
- [10] N. Kikuchi, "Development and prospects of refining techniques in steelmaking process," *ISIJ International*, vol. 60, no. 12, pp. 2700–2712, 2020. doi: **10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-186**.
- [11] L. S. Molchanov, A. S. Koveria, L. H. Kieush, Ye. V. Synehin, and M. M. Boiko, "Sposib vyplavky zalizovuhletsevoho napivproduktu v kysnevomu konverteri" ["Method of smelting iron-carbon semi-product in oxygen converter"], *UA Patent 125045 Appl. a201910881*, May 05, 2021. (Ukr.)
- [12] A. A. Pohvalityi, A. D. Kulik, E. N. Sigarev, K. I. Chubin, M. A. Kascheev, and A. N. Stoyanov, "High-temperature modeling of hot metal tapping from the converter with argon supply to the tap hole cavity," *Metallurgical and Mining Industry*, no. 5, pp. 46–50, 2017.
- [13] A. H. Cherniatevych, Ye. M. Sihariov, L. S. Molchanov, A. A. Pokhvalityi, D. S. Kondrashenkov, and O. A. Chubina, "Videofiksatsiia fizyko-khimichnykh protsesiv v porozhniyni konvertera pid chas nahrivu metalevoho brukhtu" ["Video recording of physico-chemical processes in the converter cavity during metal scrap heating"], in *Proc. XX Int. Sci.-Pract. Conf. Casting. Metallurgy*, Dnipro, Ukraine, May 28–30, 2024, pp. 507–511. doi: **10.15407/foundry-metallurgy-2024**. (Ukr.)
- [14] A. A. Pokhvalityi, Ye. M. Sihariov, K. I. Chubin, Yu. S. Lobanov, and P. A. Yakunin, "Osoblyvosti vyznachennia konstruktsii nakonechnykh kysnevnykh furn v nestatsionarnykh umovakh konverternoi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu" ["Features of determining the design of oxygen lance tips in non-stationary conditions of converter smelting with scrap preheating"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, no. 2(39), pp. 27–32, 2021. doi: **10.31319/2519-2884.39.2021.3**. (Ukr.)
- [15] R. F. Nagumanov, E. V. Protopopov, A. G. Chernyatovich, and A. V. Feoktistov, "Modeling results for the preheating of scrap by means of coal pieces in a converter," *Steel in Translation*, vol. 41, no. 4, pp. 301–306, 2011. doi: **10.3103/S0967091211040176**.
- [16] Yu. M. Borysov, V. O. Makhnitskyi, V. I. Trubavin, V. O. Khilko, L. M. Uchytel, and S. S. Brodskyi, "Sposib vyplavky stali v konverteri" ["Method of steel smelting in a converter"], *UA Patent 2461 Appl. 4943628*, Dec. 26, 1994. (Ukr.)
- [17] Ye. M. Sihariov, Yu. S. Lobanov, and A. A. Pokhvalityi, "Doslidzhennia vplyvu konstruktsii nakonechnykh furn na pokaznyky konverternoi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu" ["Investigation of the influence of the lance tip design on the indicators of converter smelting with scrap preheating"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, no. 1(38), pp. 33–38, 2021. doi: **10.31319/2519-2884.38.2021.4**. (Ukr.)

Стаття надійшла 11.02.2026

Стаття прийнята 08.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Порівняльна оцінка ефективності попереднього підігріву металобрухту в кисневому конвертері при використанні кускового та пиловугільного палива / А. Г. Чернятевич та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 258–268. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359814>.

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.