

**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 49

Том 1

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2024

**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 49

Volume 1

Section: Technical sciences

Dnipro, 2024

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2024. Вип. 49, том 1. 219 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024>.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Іщенко А.О.

Angeliki G. Lekatou

**Hossam Ahmed Mohamed
Halfa**

Sergey Edward Lyshevski

Dmytro Makarchuk

Oleksandr Vrublevskiy

Азархов О.Ю.

Белоконь К.В.

Білоусов Є.В.

Булгаков М.П.

Бялобржеський О.В.

Головань А.І.

Грицук І.В.

Губинський М.В.

Єфременко В.Г.

Кириллова О.В.

Клецька О.В.

Ковалевська О.С.

Кухар В.В.

Лук'яненко А.О.

Мазур В.О.

Маменко П.П.

Онищенко О.А.

Парфененко Ю.В.

Петренко Т.Г.

Плахтій О.А.

Позорлецкий Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пятикоп О.Є.

Сасенко 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Україна

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

Національної академії наук України, Україна

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

логій, Україна

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

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

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

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

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

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

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

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

Address: PSTU, Dmytro Yavornytskyi Avenue 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

Телефон редакції: (098) 480-24-03. **E-mail:** vestnik.pgту@gmail.com (для надсилання статей).

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

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 5 від 26.12.2024 р.

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

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2024

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

**Вичужанін В., Вичужанін А.,
Гузун О., Задорожний О.**

Математична модель для оцінки функціонального стану параметрів людського ока

6

**V. Vychuzhanin, A. Vychuzhanin,
O. Guzun, O. Zadorozhnyy**

Mathematical model for assessing the functional state of human eye parameters

**Сергієнко А.В., Балалаєва О.Ю.,
Гаркуша І.М., Платонов Д.М.**

Розробка та дослідження ефективності інформаційної системи парсингу сайтів із використанням фреймворку Selenide

16

**A. Serhiienko, O. Balalaieva,
I. Garkusha, D. Platonov**

Development and research of the efficiency of a website parsing information system using the Selenide framework

**П'ятикоп О.Є., Гніденко В.А.,
Воротнікова З.Є.**

Мобільний застосунок аналізу та прогнозування особистих витрат

28

**O. Piatykor, V. Hnidenko,
Z. Vorotnikova**

Mobile application for analyzing and forecasting personal expenses

Сергієнко А.В., Коломойченко Е.А.

Дослідження алгоритмів розпізнавання рукописних символів різних мов за допомогою моделі нейронних мереж KAN

36

A.V. Serhiienko, E.A. Kolomoichenko

Study of handwritten character recognition algorithms for different languages using the KAN Neural Network Model

Волошин В.С.

Роль нового покоління систем зі штучним інтелектом у розвитку людини (на прикладі мережі ChatGPT)

47

V.S. Voloshyn

The role of a new generation of systems with artificial intelligence in human development (on the example of the ChatGPT network)

Грицук В.Ю., Пронін С.В.

Аналіз та обґрунтування вибору моделі для моніторингу параметрів транспортного засобу та прогнозування технічного обслуговування

56

V.Yu. Hritsuk, S.V. Pronin

Analysis and justification of model selection for vehicle parameters monitoring and maintenance prediction

Мальцева О.В., Кривенко О.В.

Моделювання бізнес-процесів щодо супроводу вступної кампанії у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

73

O.V. Maltseva, O.V. Kryvenko

Modeling of business processes to support the admission campaign at the SHEI «Priazovsky State Technical University»

**Марченко І.Ф., Балалаєва О.Ю.,
Коротенко Г.М., Таразанов М.О.**

Дослідження алгоритмів стиснення зображень із використанням нейронних мереж

85

**I. Marchenko, O. Balalaieva,
H. Korotenko, M. Tarazanov**

Research of image compression algorithms using neural networks

**Кухар В.В., Снічак О.Ю.,
Балалаєва О.Ю., Марченко І.Ф.**

Розробка математичних моделей змін концентрації емульсії та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах з використанням пакету MATLAB для обробки експериментальних даних

100

**V. Kukhar, O. Spichak,
O. Balalaieva, I. Marchenko**

Development of mathematical models of changes in emulsion concentration and the content of mechanical impurities in technological fluids using the MATLAB package for experimental data processing

Кривенко О.В., Кузнецов В.О.

Моделювання та реінжиніринг бізнес-процесів фірми з продажу продукції суши-маркета

109

O.V. Kryvenko, V.O. Kuznetsov

Modeling and re-engineering of business processes of a company selling sushi-market products

Сергієнко А.В., Балалаєва О.Ю., Іванов Д.В., Вус І.В.

Розробка мобільного додатку та оптимізація методики розрахунку вартості замовлення натяжних стель з використанням нереляційної бази даних MongoDB

116

A. Serhiienko, O. Balalaieva, D. Ivanov, I. Vus

Development of the mobile application and optimization of the calculation method of the ordering cost of the stretch ceilings using NoSQL Database MongoDB

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

Яйчук О.О., Поворотний В.В.

Конструкційні особливості та новітні технології підшипників ковзання в сучасній промисловості

127

O.O. Yaichuk, V.V. Povorotnii

Constructional features and advanced technologies of journal bearings in modern industry

Іщенко А.О., Рассохін Д.О., Носовська О.В., Кравченко В.М., Бем Р.

Вивчення комплексного впливу зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами

142

A.O. Ishchenko, D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska, V.M. Kravchenko, R. Böhm

Studying the complex influence of external factors on the effectiveness of repairs with polymer composite materials

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

Засельський В.Й., Пополов Д.В.

Лабораторні дослідження динамічного стану жорсткої сіячої поверхні, діючої в вібраційно-ударному полі

152

V. Zaselskyi, D. Popolov

Laboratory studies of the dynamic state of a rigid sieving surface operating in a vibrational-impact field

Чупринов Є.В., Кассім Д.О., Швед С.В., Реков Ю.В.

Підвищення якості окатишів для металізації шляхом управління розміром донної і бортової постілі

160

Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim, S.V. Schved, Yu.V. Rekov

Improving the quality of pellets for metallization by controlling the size of the bottom and side bed

Бакланський В.М., Каргін С.Б., Хвостов Д.В.

Розробка технології конвертерної плавки із заміною частини вапна кінцевим конвертерним шлаком і вапняком

166

V.M. Baklanskiy, S.B. Kargin, D.V. Khvostov

Development of converter smelting technology with replacement of part of lime with final converter slag and limestone

Пантейков С.П.

Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання заліза газом СО при відновленні з вюститу

174

S.P. Panteikov

Thermodynamic analysis of chemical reactions conditions of iron carbonization by CO gas during reduction from wustite

Дан А.О., Трофімова Л.О., Павленко П.В.

Щодо одного з шляхів економії металу при відливанні сталевих зливків

183

L. Dan, L. Trofimova, P. Pavlenko

On the way to save metal during the steel ingot casting process

**Єфімова В.Г., Юсіна Г.А.,
Смирнов Ю.О., Пилипенко Т.М.**

Аналітичне дослідження кінетики модифікації неметалевих включень в процесі обробки розплаву сталі кальцієм

193

**V.G. Yefimova, A.L. Yusina,
Yu.O. Smirnov, T.M. Pylypenko**

Analytical acknowledgment of the kinetics of modifications of non-metal inclusions in the process of treatment of steel with calcium

Вовк А.О., Похвалітий А.А.

Дослідження умов формування газорідного потоку при випуску плавки з конвертера

200

A.O. Vovk, A.A. Pokhvalityi

Study of the conditions of gas-liquid flow formation during the tapping of the melt from the converter

**Сігарьов Є.М., Єськов Д.В.,
Крячко Г.Ю., Матина І.М.**

Дослідження ерозії вогнетривів ковшу при вдуванні газу вглиб ванни крізь обертову фурму

208

**Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov,
G.Yu. Kryachko, I.M. Matina**

Study of the erosion of ladle refractories when gas is injected deep into the bath through a rotating lance

ДО УВАГИ АВТОРІВ

219

INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 004:37:001:62

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321178

© Vychuzhanin V.¹, Vychuzhanin A.², Guzun O.³, Zadorozhnyy O.⁴

MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE FUNCTIONAL STATE OF HUMAN EYE PARAMETERS

Mathematical models of the human eye's condition should serve as adaptive tools for analyzing and predicting ophthalmological parameters, considering their interactions and individual patient characteristics. Such models are in high demand in ophthalmology because they improve the diagnosis, monitoring, and treatment of diseases, thereby enhancing patients' quality of life. The key aspects of the developed mathematical model of the human eye's condition include its structure and functionality, based on a mathematical function that integrates the eye's physiological parameters, with each parameter assigned a weight coefficient that determines its contribution to the integral indicator of the eye's condition. The model accounts for complex nonlinear interactions between parameters, reflecting the intricacies of physiological processes. To optimize weight coefficients, the L-BFGS-B method is employed, an iterative optimization technique that effectively minimizes the loss function, ensuring high accuracy and adaptation of the model to individual patient data. The advantages and applications of this model include accurate diagnosis by enabling the early detection of diseases such as glaucoma, cataracts, and macular degeneration; personalized treatment through a tailored approach that considers the unique parameter values of each patient; monitoring and prediction capabilities for analyzing disease progression and facilitating treatment adjustments in early stages; and integration with technologies, offering potential applications in virtual and augmented reality systems and artificial intelligence frameworks for automating diagnostics. The developed model serves as a universal tool for analyzing the eye's condition and creating new diagnostic and treatment technologies. It considers the interrelations between parameters and their influence on the physiological state of the eye, providing professionals with a powerful instrument for advancing ophthalmological practice.

Keywords: human eye, mathematical model, integral indicator, nonlinearity, optimization, adaptation, monitoring, prediction.

Вичужанін В., Вичужанін А., Гузун О., Задорожний О. Математична модель для оцінки функціонального стану параметрів людського ока. Математичні моделі стану людського ока повинні бути адаптивними інструментами для аналізу та прогнозування офтальмологічних параметрів з урахуванням їх взаємодій та індивідуальних особливостей пацієнта. Такі моделі затребувані в офтальмології, оскільки вони покращують діагностику, моніторинг та лікування захворювань, підвищуючи якість життя пацієнтів. Ключовими аспектами розробленої математичної моделі стану ока є її структура та функціональність. Вона заснована на математичній

¹ doctor of technical sciences, professor, Odesa Polytechnic National University, Odessa, ORCID: 0000-0002-6302-1832, v.v.vychuzhanin@op.edu.ua

² Ph.D. in computer science, assistant professor, Odesa Polytechnic National University, Odessa, ORCID: 0000-0001-8779-2503, vychuzhanin.o.v@op.edu.ua

³ candidate of medical sciences, SI «The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue Therapy of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Odessa, ORCID: 0009-0003-6873-8503, olga.v.guzun@gmail.com

⁴ doctor of medical sciences, SI «The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue Therapy of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Odessa, ORCID: 0000-0003-0125-2456, zadoroleg2@gmail.com

функції, яка інтегрує фізіологічні параметри ока, причому кожному параметру надається ваговий коефіцієнт, що визначає його внесок у інтегральний показник стану ока. Модель враховує складні нелінійні взаємодії між параметрами, що відбивають тонкощі фізіологічних процесів. Для оптимізації вагових коефіцієнтів застосовується метод L-BFGS-B – ітеративний метод оптимізації, що ефективно мінімізує функцію втрат, що забезпечує високу точність та адаптацію моделі до індивідуальних даних пацієнта. Переваги та застосування цієї моделі включають точну діагностику, що дозволяє виявляти такі захворювання, як глаукома, катаракта або макулярна дегенерація на ранніх стадіях; персоналізоване лікування завдяки врахуванню унікальних значень параметрів кожного пацієнта; моніторинг та прогнозування, що забезпечують аналіз прогресування захворювань та допомагають коригувати лікування на ранніх стадіях; інтеграцію з технологіями, включаючи можливості застосування у системах віртуальної та доповненої реальності, а також у рамках штучного інтелекту для автоматизації діагностики. Розроблена модель є універсальним інструментом для аналізу стану ока та розробки нових технологій діагностики та лікування. Вона враховує взаємозв'язки параметрів та їх вплив на фізіологічний стан ока, надаючи офтальмологам потужний інструмент для покращення діагностики, прогнозування та моніторингу очних захворювань.

Ключові слова: людське око, математична модель, інтегральний показник, нелінійність, оптимізація, адаптація, моніторинг, прогнозування.

Description of the problem. Mathematical models of the eye play a pivotal role in ophthalmology, offering effective IT solutions for the early diagnosis, monitoring, and treatment of eye diseases [1-3]. Key applications include:

- Early Diagnosis: Algorithms enable automated detection of diseases at early stages, facilitating timely medical intervention;
- Condition Monitoring: Systems track the progression of chronic diseases and assess treatment efficacy;
- Personalized Treatment: Adaptive models support therapy selection tailored to the unique characteristics of each patient;
- Improved Procedural Accuracy: Models aid in planning surgical interventions, reducing risks and enhancing outcomes;
- Scientific Research: Analysis of eye-related biological processes informs the development of innovative treatments;
- Cost Reduction: Optimized diagnostic and treatment workflows minimize unnecessary procedures, lowering overall expenses.

Models that incorporate parameters such as intraocular pressure, visual field index, and perfusion pressure enable highly accurate risk prediction for glaucoma and other pathologies. The integration of machine learning algorithms enhances the personalization and efficiency of diagnostics, providing advanced IT solutions to improve the quality of ophthalmic care.

Analysis of the latest research and publications. A review of the literature on mathematical models for the human eye highlights several areas of application relevant to both ophthalmology and IT specialists:

1. Vision Diagnosis and Correction: Models provide personalized treatment approaches and high diagnostic precision, particularly for visual anomalies and accommodation analysis. Challenges include the need for high-quality data and expert interpretation [4, 5];
2. Retinal Disease Prediction: Models predicting retinal pathologies enhance diagnosis and treatment but require standardized datasets and solutions for interpretability challenges [6, 7];
3. Simulation of Visual Processes: Models of eye-brain interactions are utilized for diagnosing vision impairments and advancing computer vision technologies. Limitations include computational demands and difficulties in generalization [8, 9];
4. Vision Correction and Restoration: Laser vision correction models improve procedural safety, though constraints arise from the complexity of biological processes and computational requirements [10];

5. Age-Related Vision Changes: Models analyzing age-related changes support early diagnosis and individualized treatment but depend on accurate data for diverse age groups and advanced biological methods [10, 11];

6. VR/AR Technologies: Integration with VR/AR improves diagnostics and treatment but faces high computational requirements and adaptation challenges [9];

7. Eye Movement Dynamics: These models are critical in medicine and VR/AR applications, with increasing effectiveness supported by advances in machine learning and accuracy improvements [9];

8. Intraocular Pressure and Heat Transfer Models: Such models predict diseases and enable personalized treatments, though they require validation and better-quality input data [12-15];

The development of a universal mathematical eye model that incorporates a wide range of factors remains a pressing task. These models hold potential for integrating diverse data to enhance the diagnosis, prediction, and treatment of ophthalmological diseases.

Purpose and task statement. The purpose of creating a mathematical model of the human eye is to provide informational support for the diagnosis and prediction of eye conditions.

Achieving this goal requires the development of an adaptive tool that considers a wide range of factors influencing the health and functionality of the eye. The development of a new mathematical model for the eye involves solving a set of tasks related to accounting for numerous interrelated factors. The model must be flexible, integrating structural and functional parameters, including nonlinear changes, the influence of physiological and external factors, and the ability to adapt to individual characteristics of a person. Ultimately, such a model will contribute to improving the diagnosis and treatment of eye diseases and enhancing people's quality of life.

Summary of the main material. The developed mathematical model of the human eye is presented as an integral indicator of its condition (S_{eye}), where the integral indicator S_{eye} is calculated considering the nonlinearity of parameters and their interconnections, the weight of each parameter, and changes influenced by the patient's age, blood flow, and other factors. The S_{eye} model describes the eye's condition as a function of key parameters:

$$S_{eye} = k1 \cdot \log(IOP + 1) + k2 \cdot \log(RQ + 1) + k3 \cdot (BCVA - h)^2 + k4 \cdot \log(Tr + 1) + (1) \\ + k5 \cdot e^{-VFI} + k6 \cdot \log(1 + Pperf) + k7 \cdot \log(1 + \alpha/t1) + k8 \cdot \log(age + 1) + k9 \cdot \\ \cdot e^{additional_factor},$$

where IOP - intraocular pressure (maintains eye tone and supports normal functioning), measured in mmHg, normal range: 10-21 mmHg (possible variation: 5-60 mmHg);

RQ - volumetric intraocular blood flow (reflects the volume of intraocular circulation), normal range: 3.2-3.5 % (possible variation: 0.5-9.0%);

$BCVA$ - best corrected visual acuity, normal: 1.0 (possible variation: 0-2.0);

Tr - tear production, measured in mm, normal range: 10-30 mm (possible variation: 1.0-40.0 mm);

VFI - visual field index, normal value: 100%;

$Pperf$ - perfusion pressure (supports blood supply to the eye tissues), normal range: 55-80 mmHg (possible variation: 20.0-100.0 mmHg);

$\alpha/t1$ - tone of intraocular vessels, normal range: 18-20% (possible variation: 12.0-35.0%), where α is the autoregulation coefficient;

age - the person's age;

$additional_factor$ - an additional factor (lifestyle, diseases, genetic traits, etc.);

$k1 \dots k9$ - weighting coefficients.

Parameters such as IOP , RQ , $BCVA$, and VFI fluctuate within their normal ranges, yet their variations can significantly impact the overall state of the eye [16]. Tr , IOP , and $Pperf$ are critical for maintaining intraocular pressure and adequate blood supply. Age and additional factors can modify various parameters, influencing their weight within the model. Each parameter in the model is interrelated through equations:

$$1. IOP \leftrightarrow Pperf : Pperf = Psystolic - IOP.$$

At high IOP , the perfusion pressure decreases, reducing the blood supply to the eye, thereby increasing the risk of glaucoma;

$$2. IOP \leftrightarrow RQ : RQ \propto Pperf \propto Psystolic - IOP.$$

The effect of high *IOP* leads to unstable ocular blood flow, which results in ischemia and damage to the optic nerve;

$$3. Pperf \leftrightarrow RQ : RQ = k \cdot Pperf^n,$$

where *n* is an empirical parameter (usually *n*=1 or *n*<1).

When *Pperf* decreases (for example, due to high *IOP* or low blood pressure), blood flow decreases;

$$4. BCVA \leftrightarrow VFI: BCVA \propto VFI.$$

Loss of visual field (*VFI*) leads to a decrease in visual acuity (*BCVA*);

$$5. Age \leftrightarrow RQ, VFI: RQ = RQ_0 \cdot e^{-k_{age} \cdot age}; VFI_{age} = VFI_0 - k_{age} \cdot age;$$

$$6. Tr \leftrightarrow IOP: IOP_{corr} = IOP_{meas} + k \cdot (Tr - Tr_{norm});$$

$$7. \alpha/tl \leftrightarrow Pperf, RQ: RQ = RQ_{base} \cdot \alpha/tl (Pperf);$$

$$8. Additional\ factor \leftrightarrow IOP, RQ: IOP = IOP_0 + k_{add} \cdot Factor; RQ = RQ_0 \cdot e^{-k_{add} \cdot Factor}$$

The *S_{eye}* model is a mathematical model with nonlinear dependencies that allows for the quantitative assessment of the complex impact of various factors on the condition of the eye. The model flexibly considers the characteristics of each parameter through their transformations and weighting factors. Nonlinearities are introduced using exponential and polynomial functions, selected based on biological logic or empirical data [17, 18], which allowed the model parameters to be represented as follows:

$$IOP_{effect} \log(IOP + 1); RQ_{effect} \log(RQ_{effect} + 1); BCVA_{effect} (BCVA - h)^2; \quad (2)$$

$$Tr_{effect} = \log(Tr + 1); VFI_{effect} = e^{-VFI}; Pperf_{effect} = \log(Pperf + 1);$$

$$\frac{\alpha}{tl_{effect}} = \log\left(\frac{\alpha}{tl} + 1\right); age_{effect} = \log(age + 1);$$

$$additional_factor_{effect} = e^{additional_factor},$$

where *h* is the threshold value for *BCVA* (empirically chosen).

Nonlinear dependencies in the model (logarithmic, parabolic, and exponential) account for the different effects of parameters on the state of the eye. Logarithmic dependencies (e.g., *IOP*, *RQ*, *Tr*, *Pperf*, *age*) describe increasing influence with a decelerating rate. The parabolic dependence (*BCVA*) shows an intensification of the effect up to a certain level, followed by its decrease. Exponential dependencies (*VFI*, *additional_factor*) reflect sharp changes in influence during fluctuations of parameters. This approach, based on theoretical and practical data, allows for accounting complex interactions of factors, making the model more accurate and realistic.

To implement the model, Python was used due to its convenient syntax, cross-platform compatibility, and the availability of powerful libraries (such as *scipy.optimize* and *scikit-learn*), which provide numerical optimization and machine learning capabilities [19]. The eye state model depends on parameters (e.g., *IOP*, *BCVA*) and their weight coefficients *k1*, *k2*, ..., *k9*, which significantly impact the final value of *S_{eye}*. Changes in parameters, such as *IOP* (by 5-10 mm Hg) or *BCVA* (from 1.0 to 0.1), can significantly vary the result from normal to pathological states (e.g., glaucoma or complete blindness).

To optimize the coefficients *k1*, *k2*, ..., *k9*, the L-BFGS-B method from the SciPy library was used [19]. This iterative gradient-based method is suitable for problems with a large number of variables as it utilizes an approximate Hessian matrix, speeding up the process and improving accuracy. The method sets initial values, defines parameter bounds, and minimizes the objective function *S_{eye}*, efficiently optimizing the nonlinear dependencies of the model.

The optimization algorithm for *k1*, *k2*, ..., *k9* using the L-BFGS-B method includes:

- Objective: Minimize the objective function by calculating the optimal coefficients *k1*, *k2*, ..., *k9* to determine the state of the eye, considering nonlinear dependencies on parameters.

- Steps of the algorithm:

1. Initialization:

- Request parameter values for analyzing the eye's state (*IOP*, *RQ*, *BCVA*, *Tr*, *VFI*, *Pperf*, *alpha*, *age*, *additional_factor*).

- Set initial values for coefficients *k1*, *k2*, ..., *k9* (e.g., ranging from 0.1 to 10.0).

- Input constraints on the ranges of *k1*, *k2*, ..., *k9*.

Each parameter *k1*, *k2*, ..., *k9* is bounded within a specific range:

$$ai \leq ki \leq bi.$$

This ensures a physical interpretation of the parameters and prevents invalid values. The method accounts for constraints through gradient projection. At each step, it checks whether the parameters *k1*,

$k_2, \dots, k_9$ exceed the boundaries $[a_i, b_i]$. If they do, the current value of k_i is projected onto the permissible range:

$$k_i = \text{proj}_{[a_i, b_i]}(k_i) - \min(\max(k_i, a_i), b_i). \quad (3)$$

A function is defined that calculates the eye condition indicator (S_{eye}) based on the input parameter values, including the coefficients.

2. Defining the objective function:

- Describe the eye condition function ($\text{calculate_}S_{eye}$), which depends on parameters and the optimized coefficients $k_1, k_2, \dots, k_9$. This function will account for nonlinear dependencies, such as: logarithmic relationships for parameters IOP , RQ , Tr , α , and $Pperf$; parabolic relationships for visual acuity ($BCVA$); exponential relationships for VFI and additional_factor .

- Calculate the eye condition (S_{eye}), considering all parameters.

- Define the objective function for minimization. The objective function will compute the error or deviation from the ideal eye condition value based on the current values of the coefficients $k_1, k_2, \dots, k_9$. The objective function for minimization, to compute the eye condition value based on the current coefficients $k_1, k_2, \dots, k_9$, takes the following form:

$$\min_{k_1, k_2, \dots, k_9} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_{eye_{pred}}(k_1, k_2, \dots, k_9, a_i) - S_{eye_{obs,i}})^2, \quad (4)$$

where $S_{eye_{pred}}$ - the value calculated using the model, including nonlinear dependencies for all parameters;

$S_{eye_{obs}}$ - reference or observed data;

a_i - model parameters.

3. Optimization using the L-BFGS-B method: Use `scipy.optimize.minimize()` with the L-BFGS-B method to minimize the objective function; obtain the optimized values of coefficients $k_1, k_2, \dots, k_9$ that minimize the deviation of the eye condition from the target value.

4. Update: At each iteration step, the following are performed: updating parameters $k_1, k_2, \dots, k_9$ using the Hessian approximation and projection.

5. Termination criterion: The algorithm terminates when the change in $k_1, k_2, \dots, k_9$ or the gradient becomes less than a given threshold.

6. Result: Calculation of the eye condition using $k_1, k_2, \dots, k_9$.

7. Output of optimized coefficients and computed eye condition considering the coefficients.

8. Plotting graphs to visualize the relationship between the eye condition and various parameters.

Figure 1 shows the contour plot of the objective function for the coefficients k_1 and k_2 of the model, with the other parameters held fixed. This visualization approach helps to analyze the dependence of the error function, identify key trends, and understand the impact of the parameters on the result. The two-dimensional representation simplifies finding extrema, adjusting initial values, and improving the optimization process.

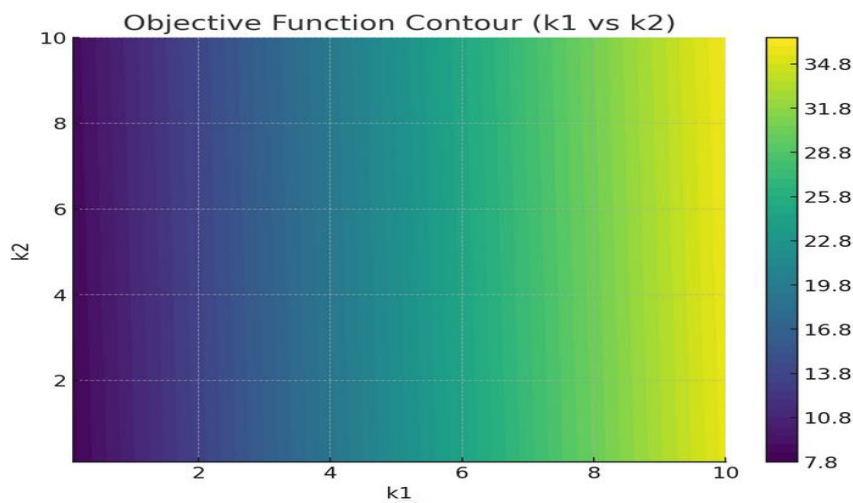


Fig. 1 – Contour plot of the objective function for the two coefficients k_1 and k_2

The graph demonstrates the dependence of the loss function on the parameters $k1$ and $k2$, which vary from 0 to 10. The color scale represents the function values: green shades correspond to the minimum (closer to the optimum), while purple represents the maximum values. The contours denote lines of equal error, helping to localize the minima and maxima. The function values range from 7.8 to 35, with the lowest errors in the central region. The use of two parameters for visualization is explained by the need to simplify the analysis in multidimensional problems. This approach allows an intuitive understanding of the dynamics of optimization and the influence of parameters on the function. For analyzing all nine parameters, more complex methods are required, such as projections or multidimensional analysis. Examples in Figures 2 and 3 show the simulation results for the state of the eye (S_{eye}) depending on the parameters $VF1$ and RQ , taking their nonlinearity and the optimization of the model's weight coefficients into account.

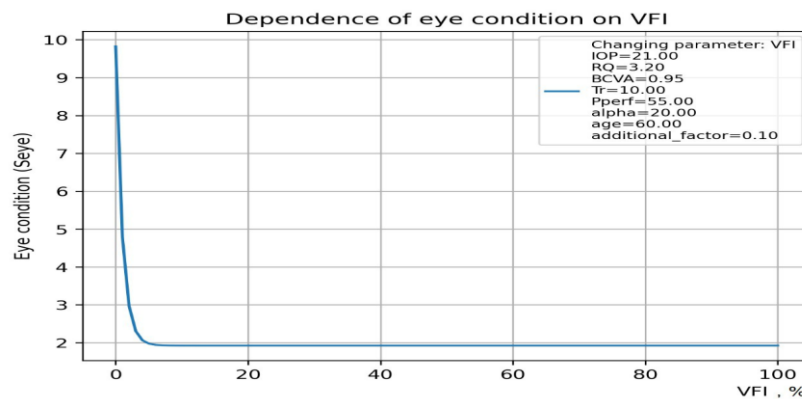


Fig. 2 – State of the eye (S_{eye}) based on changes in $VF1$

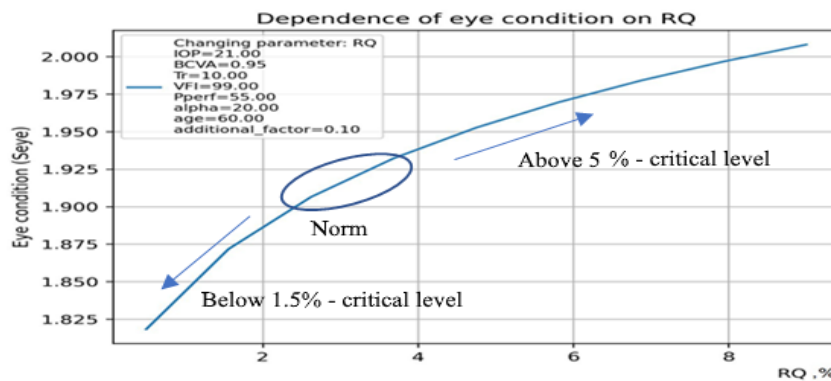


Fig. 3 – State of the eye (S_{eye}) based on changes in RQ

The analysis of the graph showing the change in the eye's state (S_{eye}) based on changes in $VF1$ (Fig. 2) reveals an exponential decrease in S_{eye} as the $VF1$ value increases. $VF1$ reflects the visual field function, influenced by other factors. The relationship between S_{eye} and $VF1$ is nonlinear and exhibits an asymptotic pattern. The exponential influence ($VF1$ graph) highlights the high sensitivity of the eye's state to a decline in its functionality, with particularly strong effects at lower values. This suggests that during the early stages of $VF1$ deterioration, the eye's state is most sensitive to changes, and any decrease in the visual field below 100% affects visual function and structural-functional damage to the optic nerve. Therefore, maintaining $VF1$ at 100% is crucial for stabilizing the eye's state. High $VF1$ values (close to 100%, representing near-complete preservation of functionality) have less impact on the eye's condition. A decrease in $VF1$ is likely linked to the overall deterioration of the ocular structures, resulting in significant changes in S_{eye} . The graph clearly shows a sharp decline in the eye's condition (S_{eye}) when $VF1$ drops below 100%. A visual field loss of more than 50% ($VF1 < 50\%$) may be irreversible and associated with the terminal stage of glaucoma. Some stabilization of S_{eye} at around ~ 2 when $VF1$ is

100% suggests that maintaining this parameter helps preserve the structural-functional parameters of the visual system and keeps the eye's state stable. This graph also indicates that even with normal intraocular pressure, a decrease in *VFI* reveals all the traditional signs of disease, such as glaucomatous optic nerve damage, which is reflected in the eye's state.

The analysis of the graph showing the change in the eye's state (S_{eye}) based on changes in *RQ* (Fig. 3) demonstrates that S_{eye} increases as *RQ* increases, indicating a negative correlation between the parameters. The increase in S_{eye} is nearly linear across the entire range of *RQ* values (from 1% to 8%). This could be related to a decrease in ocular circulation (*RQ* up to 3.2%), which may occur with age-related changes in the eye, glaucoma, high myopia, or the manifestation of ischemic diseases affecting the head and eyes. The linear growth suggests the presence of critical thresholds or saturation points (below 1.5% and above 5%), making *RQ* an important parameter for improving the eye's state. The absence of saturation indicates a constant impact of *RQ* on the eye's condition.

An increase in *RQ* directly improves the eye's condition (S_{eye}), and the effect is consistent across the entire range of values. This highlights the importance of controlling or increasing the *RQ* parameter to maintain eye health, especially when other parameters, like *VFI*, are stable within normal ranges. Such a relationship can be used as an indicator for assessing the quality of therapy or vision correction.

The parameters *VFI* and *RQ* are key factors influencing S_{eye} , each with different characteristics:

- *VFI* has the greatest impact on the eye's state in the early stages of deterioration, related to the progression of diseases affecting the visual field.
- *RQ* reflects changes in the eye's state nonlinearly, highlighting the importance of intraocular circulation in the condition and function of the eye.

Possible diagnoses:

- Glaucoma: Low *VFI* values, particularly when combined with elevated intraocular pressure (*IOP*), and a decrease in visual acuity (*BCVA*), are markers of disease progression.
- Age-related eye diseases (e.g., age-related macular degeneration, cataracts): Low *RQ* leads to reduced perfusion pressure, diminishing blood, oxygen, and nutrient supply to the eye's structures, slowing metabolic processes and promoting the accumulation of metabolic waste. High *RQ* may indicate congestion within the eye (e.g., retinal vein occlusion, neovascular glaucoma, or intraocular inflammation), which can significantly affect overall vision health.

Recommendations:

Maintaining the most preserved visual field (*VFI*=100%) should be the primary goal of therapy, especially for patients with glaucoma.

Continuous monitoring of *RQ*, especially in elderly patients diagnosed with intraocular diseases. Improving intraocular volumetric blood circulation (through physiotherapeutic methods such as laser stimulation, electrophoresis with vascular medications, and pharmacological therapy) helps improve the eye's condition.

To maintain eye health, a comprehensive approach is required, taking into account the interaction between various model parameters. It is crucial to analyze both the individual effects of each parameter and their interrelationships. For example, high *IOP* leads to a decrease in *Pperf*, which negatively affects intraocular blood circulation (*RQ*) and contributes to the development of ischemic diseases, ultimately affecting vision. The interaction between *VFI*, *IOP* and *RQ* shows that vision field deterioration is closely linked to both intraocular pressure and insufficient blood supply. The *Pperf* parameter helps improve blood flow, which positively affects the general condition of the eye, but its influence is highly dependent on *RQ*. *Alpha* (α/t_i) has an indirect effect through a complex of factors, while age (*Age*) is associated with a decrease in *BCVA* and *VFI*, making it an important parameter for assessing age-related changes in visual acuity. Maintaining the *VFI* parameter at its maximum level helps stabilize the eye's condition, while a decrease in *VFI* may indicate the development or progression of glaucoma. The *Tr* parameter is closely related to *BCVA*: a reduction in tear production can cause dry eye syndrome and significantly reduce visual acuity, which reflects the eye's condition.

To validate the program's functionality and the accuracy of calculations, module tests were performed covering various scenarios of input data changes. This allowed for assessing the model's response to different conditions. Particular attention was given to the model's sensitivity, including the impact of parameters such as the shape of the eyeball or retinal light sensitivity. Sensitivity analysis revealed vulnerabilities and helped improve the algorithm's robustness. The accuracy of calculations was verified using both quantitative methods, comparing results with expected values, and qualitative

methods, evaluating the match with theoretical expectations. To assess practical applicability, scenarios close to real medical practice were tested. This approach ensured the model's predictive accuracy and its practical value in medical and technological applications.

Example of modular testing

```
import unittest
# Modular tests for functions
class TestSeyeCalculation(unittest.TestCase):
    # Test the function for nonlinear IOP dependency
    def test_non_linear_iop(self):
        self.assertAlmostEqual(non_linear_iop(10), np.exp(10 / 10), places=5)
        self.assertAlmostEqual(non_linear_iop(0), np.exp(0 / 10), places=5)
    # Test the function for nonlinear tear quality dependency
    def test_non_linear_q(self):
        self.assertAlmostEqual(non_linear_q(50, 60), np.log(50 + 1) * np.sqrt(60), places=5)

# Test Seye calculation with fixed values
def test_calculate_seye_with_fixed_values(self):
    iop = 20
    q = 50
    v = 90
    tr = 10
    pvf = 3
    pperf = 5
    rvessels = 2
    age = 60
    additional_factor = 2
    expected_seye = (optimized_coefficients[0] * non_linear_iop(iop) +
                    optimized_coefficients[1] * non_linear_q(q, age) +
                    optimized_coefficients[2] * non_linear_v(v, age) +
                    optimized_coefficients[3] * non_linear_tr(tr, age) +
                    optimized_coefficients[4] * non_linear_pvf(pvf) +
                    optimized_coefficients[5] * non_linear_ppperf(ppperf) +
                    optimized_coefficients[6] * non_linear_rvessels(rvessels) +
                    optimized_coefficients[7] * non_linear_age(age) +
                    optimized_coefficients[8] * non_linear_additional_factor(additional_factor))
    self.assertAlmostEqual(calculate_seye_with_optimized_coeffs(iop, q, v, tr, pvf, pperf,
rvessels, age, additional_factor, optimized_coefficients), expected_seye, places=5)
if __name__ == '__main__':
    unittest.main()
```

For model adequacy testing, it is compared with existing scientific and medical models. The new model demonstrates compliance with standards and improves current approaches, particularly in the aspects of parameter interactions and forecasting their impact on eye health.

Conclusions

The developed eye state model effectively considers key parameters and their complex nonlinear interactions, making it a tool for diagnosis, forecasting, and personalized treatment. The model, which has demonstrated adequate results in the context of ophthalmological practice, can be used for early diagnosis, monitoring disease progression, and developing individual treatment strategies.

The eye state model serves several key functions: early diagnosis, monitoring and forecasting diseases, as well as treatment personalization. It analyzes the main parameters of the human eye, identifying diseases at early stages and predicting their development. For example, high *IOP* with low *RQ* may indicate a risk of glaucoma, and a reduction in *VFI* against the background of increased *IOP* signals glaucoma progression. The model also considers interactions between parameters such as age, *Pperf*, *BCVA* and *RQ*, which helps predict disease risks associated with ischemia, such as age-related macular degeneration, ischemic optic neuropathy, atherosclerotic or diabetic retinopathy.

Possible applications of the model include adaptive diagnostics considering individual patient characteristics, improving the accuracy of disease forecasting, integration with artificial intelligence for automated diagnostics and model adaptation. Additionally, the model could be integrated with virtual and augmented reality, as well as with laser and pharmacological treatment methods to enhance therapy effectiveness and patient quality of life.

References:

1. V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, O. Guzun, O. Zadorozhnyy, A. Korol, and I. Gritsuk, «Artificial intelligence Integration in the diagnosis, prognosis and diabetic neovascular glaucoma treatment», in Proc. XII Int. Sci. and Pract. Conf. «Information Control Systems and Technologies», Odesa, 2024, vol. 3790, pp. 238-249.
2. N. Aksak et al., *Rozvytky informatsiino-keruiuchykh system ta tekhnolohii : monohrafiia* [Advances in information-control systems and technologies: monografy], V. Vychuzhanin, Ed., Lviv-Torun, Ukraine: Liha-Pres Publ., 2024. doi: 10.36059/978-966-397-422-4. (Ukr., Eng.)
3. O. Guzun et al., «A neural network model for predicting the effectiveness of treatment in patients with neovascular glaucoma associated with diabetes mellitus», *Romanian journal of Ophthalmology*, vol.68, pp. 294-300, 2024. doi: 10.22336/rjo.2024.53.
4. Y. Tong, W. Lu, Y. Yu, and Y. Shen, «Application of machine learning in ophthalmic imaging modalities», *Eye and Vision*, vol. 7, pp. 1-15, 2020. doi: 10.1186/s40662-020-00183-6.
5. E. Moisesescu et al., «Digital Twin Models for Personalised and Predictive Medicine in Ophthalmology», *Technologies*, vol. 12(4), pp. 1-25, 2024. doi: 10.3390/technologies12040055.
6. Y. Tan et al., «Prognostic potentials of AI in ophthalmology: systemic disease forecasting via retinal imaging», *Eye and Vision*, vol. 11, pp. 1-18, 2024. doi: 10.1186/s40662-024-00384-3.
7. M.W. Nadeem, H.G. Goh, M. Hussain, S.Y. Liew, I. Andonovic, and M.A. Khan, «Deep Learning for Diabetic Retinopathy Analysis: A Review, Research Challenges, and Future Directions», vol. 22(18), article 6780, 2022. doi: 10.3390/s22186780.
8. Z. Tang et al., «Eye movement characteristics in a mental rotation task presented in virtual reality», *Frontiers in Neuroscience*, vol. 17, pp. 01-11, 2023. doi: 10.3389/fnins.2023.1143006.
9. B. Wei, Y. Zhao, K. Hao, and L. Gao, «Visual Sensation and Perception Computational Models for Deep Learning: State of the art, Challenges and Prospects», pp. 1-14, 2021. [Online]. doi: 10.48550/arXiv.2109.03391.
10. N. Erdinest, N. London, and I. Lavy, «Vision through Healthy Aging Eyes», *Vision*, vol. 5(4), pp. 1-12, 2021. doi: 10.3390/vision5040046.
11. B.K. Swenor, M.J. Lee, V. Varadaraj, H.E. Whitson, and P.Y. Ramulu, «A Framework for Assessing the Impact of Visual Impairment on Older Adults», *The Gerontologist*, vol. 60, iss. 6, pp. 989-995, 2020. doi: 10.1093/geront/gnz117.
12. B.S. Gardiner, D.W. Smith, M. Coote, and J.G. Crowston, «Computational modeling of fluid flow and intra-ocular pressure following glaucoma surgery», *PLoS*, vol. 60, pp. 989-995, 2020. doi: 10.1371/journal.pone.0013178.
13. V. Semenyuk, «Thermal interaction of multi-pulse laser beam with eye tissue during retinal photo-coagulation: Analytical approach», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 112, pp. 480-488, 2017. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.013.
14. O. Zadorozhnyy, N. Savin, and A. Buiko, «Improving the technique for controlled cryogenic destruction of conjunctival tumors located in the projection of the ciliary body onto the sclera: A preliminary report», *Journal of Ophthalmology*, vol. 5, pp. 60-65, 2018. doi: 10.31288/oftalmolzh201856065.
15. K. Barton, J. Jonas, and J. Chodosh, «Highlights from this issue», *British Journal of Ophthalmology*, vol. 104, № 9, pp. 104-110, 2020. doi: 10.1136/bjophthalmol-2020-317668.
16. M. Cardoso, M. F. Torres, M. R. de Moraes Rego, and L. C. Santiago, «Influence of application site of provisional cement on the marginal adaptation of provisional crowns», *Journal of Applied Oral Science*, vol. 16(3), pp. 214-218, 2008. doi: 10.1590/S1678-77572008000300010.
17. S. Howie, and A. Tinker, «Are we on the same page? Exploring the role of the geriatrician in the care of the older surgical patient from the perspective of surgeons and geriatricians», *Clinical Medicine*, vol. 18, № 5, pp. 374-379, 2018. doi: 10.7861/clinmedicine.18-5-374.

18. O. Adeolu, *Essential Guide to Python for All Levels Collection: Forging Ahead in Tech and Programming*. 2024.
19. J. Nocedal, and S. Wright, *Numerical Optimization*, in Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. 2006. doi: [10.1007/978-0-387-40065-5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5).

Перелік використаних джерел:

1. Artificial intelligence Integration in the diagnosis, prognosis and diabetic neovascular glaucoma treatment / V. Vychuzhanin et al. *ICST-2024 : Proceedings of XII International Scientific and Practical Conference «Information Control Systems and Technologies»*, Odesa, 23-25 September 2024. Vol. 3790. Pp. 238-249.
2. Розвитки інформаційно-керуючих систем та технологій : монографія / Н. Аксак та ін.; під наук. ред. проф. В.Вичужаніна. Львів-Торунь : Liha-Pres, 2024. 380 с. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-422-4>.
3. A neural network model for predicting the effectiveness of treatment in patients with neovascular glaucoma associated with diabetes mellitus / O. Guzun et al. *Romanian journal of Ophthalmology*. 2024. Vol.68. Pp. 294-300. DOI: <https://doi.org/10.22336/rjo.2024.53>.
4. Application of machine learning in ophthalmic imaging modalities / Tong Y., Lu W., Yu Y., Shen Y. *Eye and Vision*. 2020. Vol. 7. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40662-020-00183-6>.
5. Digital Twin Models for Personalised and Predictive Medicine in Ophthalmology / E. Moisesescu et al. *Technologies*. 2024. Vol. 12(4). Pp. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12040055>.
6. Prognostic potentials of AI in ophthalmology: systemic disease forecasting via retinal imaging / Y. Tan et al. *Eye and Vision*. 2024. Vol. 11. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40662-024-00384-3>.
7. Deep Learning for Diabetic Retinopathy Analysis: A Review, Research Challenges, and Future Directions / H. Goh et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22(18). Article 6780. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22186780>.
8. Eye movement characteristics in a mental rotation task presented in virtual reality / Z. Tang et al. *Frontiers in Neuroscience*. 2023. Vol. 17. Pp. 01-11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1143006>.
9. Visual Sensation and Perception Computational Models for Deep Learning: State of the art, Challenges and Prospects / Wei B., Zhao Y., Hao K., Gao L. 2021. Pp. 1-14. [Електронний ресурс] DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.03391>.
10. Erdinest N., London N., Lavy I. Vision through Healthy Aging Eyes. *Vision*. 2021. Vol. 5(4). Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/vision5040046>.
11. A Framework for Assessing the Impact of Visual Impairment on Older Adults / B. K. Swenor et al. *The Gerontologist*. 2020. Vol. 60. Iss. 6. Pp. 989-995. DOI: <https://doi.org/10.1093/geront/gnz117>.
12. Computational modeling of fluid flow and intra-ocular pressure following glaucoma surgery / Gardiner B. S., Smith D. W., Coote M., Crowston J. G. *PLoS*. 2020. Vol. 60. Pp. 989-995. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013178>.
13. Semenyuk V. Thermal interaction of multi-pulse laser beam with eye tissue during retinal photo-coagulation: Analytical approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 112. Pp. 480-488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.013>.
14. Zadorozhnyy O., Savin N., Buiko A. Improving the technique for controlled cryogenic destruction of conjunctival tumors located in the projection of the ciliary body onto the sclera: A preliminary report. *Journal of Ophthalmology*. 2018. Vol. 5. Pp. 60-65. DOI: <https://doi.org/10.31288/of-talmolzh201856065>.
15. Barton K., Jonas J., Chodosh J. Highlights from this issue. *British Journal of Ophthalmology*. 2020. Vol. 104. № 9. Pp. 104-110. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2020-317668>.
16. Influence of application site of provisional cement on the marginal adaptation of provisional crowns / Cardoso M., Torres M. F., de Moraes Rego M. R., Santiago L. C. *Journal of Applied Oral Science*. 2008. Vol. 16(3). Pp. 214-218. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-77572008000300010>.
17. Howie S., Tinker A. Are we on the same page? Exploring the role of the geriatrician in the care of the older surgical patient from the perspective of surgeons and geriatricians. *Clinical Medicine*. 2018. Vol. 18. № 5. Pp. 374-379. DOI: <https://doi.org/10.7861/clinmedicine.18-5-374>.

18. Adeolu O. Essential Guide to Python for All Levels Collection: Forging Ahead in Tech and Programming. 2024. 314 p.
19. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. 2006. 664 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>.

Стаття надійшла 15.10.2024

Стаття прийнята 28.10.2024

УДК 004.62: 658.5

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321179

© Сергієнко А.В.¹, Балалаєва О.Ю.², Гаркуша І.М.³, Платонов Д.М.⁴

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПАРСИНГУ САЙТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ФРЕЙМВОРКУ SELENIDE

Стаття присвячена дослідженню методів автоматизації збору даних із вебсайтів за допомогою технологій парсингу. У роботі описано основні переваги парсингу порівняно з ручним збором даних, наведено класифікацію існуючих парсерів, їх можливості, обмеження та застосування в реальних проєктах. Проведено детальний аналіз популярних комерційних та безкоштовних парсерів, таких як Import.io, Webhose.io, Dexi.io, Scraperhub, ParseHub, Visual Scraper, Spinn3r, 80legs, Scraper, OutWit Hub, з метою визначення їх переваг та недоліків у різних сценаріях використання. Особливу увагу приділено порівнянню фреймворків Selenium та Selenide, що широко застосовуються для автоматизації взаємодії з веббраузерами. Зроблено висновки про доцільність використання фреймворку Selenide завдяки його спрощеному синтаксису, можливостям роботи з динамічним контентом та підтримці інтелектуального очікування. У статті представлено розробку власного парсера на базі Selenide, орієнтованого на потреби малих і середніх підприємств із обмеженим бюджетом. Система побудована на сучасному технологічному стеку, що включає Java 11, Python, PostgreSQL, Angular 12, Docker, Gradle, Kafka, Node.js. Детально описано архітектуру програми, взаємодію між модулями, а також реляційну модель бази даних для зберігання отриманих даних. Запропонований підхід дозволяє налаштовувати парсер для роботи з різними типами сайтів, забезпечує високу швидкість збору та обробки інформації, а також гнучкість у налаштуванні параметрів вибірки. Створений інструмент надає можливість використовувати технології контейнеризації для спрощення розгортання та підтримки додатка. Результати роботи можуть бути використані для реалізації ефективних інформаційно-пошукових систем та автоматизації рутинних процесів збору даних, що особливо актуально для компаній, які прагнуть оптимізувати свої бізнес-процеси та зменшити витрати.

Ключові слова: парсинг, парсер, сайт, вебдодаток, інформаційно-пошукова система, дані, Selenium, Selenide.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaeva_e_u@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-1190-1501, garkusha.i.m@nmu.one

⁴ магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, platonov_d_m@pstu.edu

A. Serhiienko, O. Balalaieva, I. Garkusha, D. Platonov. Development and research of the efficiency of a website parsing information system using the Selenide framework. The article is devoted to the study of methods for automating data collection from websites using parsing technologies. The paper describes the main advantages of parsing compared to manual data collection, provides a classification of existing parsers, their capabilities, limitations and application in real projects. A detailed analysis of popular commercial and free parsers, such as Import.io, Webhose.io, Dexi.io, Scraperhub, ParseHub, Visual Scraper, Spinn3r, 80legs, Scraper, OutWit Hub, is carried out in order to determine their advantages and disadvantages in various usage scenarios. Particular attention is paid to the comparison of the Selenide and Selenium frameworks, which are widely used to automate interaction with web browsers. The conclusion is made about the feasibility of using the Selenide framework due to its simplified syntax, capabilities for working with dynamic content and support for intelligent waiting. The article presents the development of a custom parser based on Selenide, focused on the needs of small and medium-sized enterprises with a limited budget. The system is built on a modern technology stack, including Java 11, Python, PostgreSQL, Angular 12, Docker, Gradle, Kafka, Node.js. The program architecture, interaction between modules, and the relational database model for storing the obtained data are described in detail. The proposed approach allows you to configure the parser to work with different types of sites, provides high speed of information collection and processing, as well as flexibility in configuring sampling parameters. The created tool provides the opportunity to use containerization technologies to simplify the deployment and support of the application. The results of the work can be used to implement effective information search systems and automate routine data collection processes, which is especially important for companies that seek to optimize their business processes and reduce costs.

Keywords: web parsing, web parser, web site, web application, information search system, data, Selenium, Selenide.

Постановка проблеми. У сучасному світі швидкий доступ до структурованої інформації є ключовою вимогою для ефективного функціонування бізнесу. Вебсайти виступають основним джерелом актуальних даних, які можуть використовуватися для маркетингових досліджень, аналізу конкурентів або оптимізації внутрішніх процесів, проте ручний збір даних вже давно є неефективним через значні витрати часу та високу ймовірність помилок. Це обумовлює зростання попиту на автоматизовані інформаційно-пошукові системи парсингу, які дозволяють отримувати великий обсяг необхідних даних у зручному форматі з мінімальним втручанням людини. Доцільність використання парсерів обумовлена швидкістю їх роботи, можливістю складання вибірки за багатьма параметрами та налаштування парсингу з певною періодичністю, а також не лише відсутністю помилок у звітах, а й рекомендаціями щодо виправлення помилок на сайті. На сьогоднішній день існує багато сервісів для парсингу, які можуть бути як хмарними, так і коробковими версіями. Водночас слід зазначити, що існуючі інструменти мають низку обмежень, пов'язаних із складністю налаштування, недостатньою гнучкістю або високою вартістю, що створює труднощі для малих і середніх підприємств. Тому актуальною задачею є розробка власного парсера, для чого необхідно проаналізувати сферу застосування парсингу, обрати необхідний функціонал, а також провести дослідження ефективності роботи створеного парсера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Import.io пропонує розробникові легко формувати власні пакети даних, для чого необхідно тільки імпортувати інформацію з певної вебсторінки й експортувати її в CSV. Це дозволяє збирати інформацію з тисячі вебсторінок дуже швидко, при цьому не написавши ні рядка коду, а також створювати тисячі API згідно з заданими вимогами. Тариф Starter призначений для простих випадків використання, таких як видалення даних зі статичних сайтів, та включає тільки базові функції. Даний тариф містить 5 000 запитів на місяць та вартує від 199 доларів на місяць. Тариф Standard дозволяє працювати з більш складнішими завданнями, такими як робота з динамічними сайтами, капчами або аутентифікацією, містить 20 000 запитів та коштує від 599 доларів на місяць. Разом з веб інструментом доступні безкоштовні застосування для Windows, Mac OS X і Linux для створення екстракторів і пошукових роботів. Import.io підходить для швидкого збору даних, але може бути недостатньо потужним

для складних або масштабних проєктів. Даний інструмент може мати труднощі з обробкою сайтів із динамічним контентом, а зміна структури сайту може зламати налаштування імпорту.

Webhose.io [1] забезпечує прямий доступ в реальному часі до структурованих даних, отриманих у результаті парсингу тисяч онлайн джерел. Цей парсер здатний збирати вебдані на більш ніж 240 мовах і зберігати результати в різних форматах, у тому числі в XML, JSON і RSS. Webhose.io представляє собою вебзастосування для браузера, що використовує власну технологію парсингу даних, яка дозволяє обробляти величезні об'єми інформації з численних джерел з єдиним API. Webhose пропонує безкоштовний тарифний план за обробку 1 000 запитів в місяць і 50 доларів за преміальний план, що покриває 5 000 запитів в місяць. Webhose.io робить фокус на текстовому контенті, тому не дуже підходить для вилучення мультимедіа (зображень чи відео).

Dexi.io [2] (попередня назва CloudScraper) здатний парсити інформацію з будь якого вебсайту і не вимагає завантаження додаткових застосувань, як і Webhose, а редактор самостійно встановлює своїх пошукових роботів і отримує дані в режимі реального часу. Користувач може зберегти зібрані дані в хмарі, наприклад, Google Drive і Box.net, або експортувати дані у форматах CSV або JSON. CloudScraper забезпечує анонімний доступ до даних, пропонуючи ряд проксі-серверів, які допомагають приховати ідентифікаційні дані користувача. CloudScraper зберігає дані на своїх серверах впродовж 2 тижнів, потім архівуючи їх. Сервіс пропонує 20 годин роботи безкоштовно, після чого він коштуватиме 29 доларів в місяць. Dexi.io підходить для автоматизації веб-скрейпінгу без глибоких технічних знань, але для великих або специфічних проєктів можуть знадобитися додаткові налаштування чи ресурси.

Scrapinghub (зараз Zyte) [3] представляє собою хмарний інструмент парсингу даних, який допомагає вибирати і збирати необхідні дані для будь-яких цілей. Scrapinghub використовує Crawlera, розумний проксі-ротатор, оснащений механізмами, здатними обходити захисту від ботів. Сервіс здатний справлятися з великим обсягом інформації і захищеними від роботів сайтами. Scrapinghub перетворює вебсторінки в організований контент. Базовий безкоштовний пакет дає доступ до одного пошукового робота (обробка до 1 Гб даних, далі – 9 доларів в місяць), преміальний пакет надає чотирьох паралельних пошукових ботів. Scrapinghub варто використовувати для професійного вебскрейпінгу, але даний сервіс може бути складним і затратним для простих задач чи новачків.

ParseHub [2] може парсити один або багато сайтів з підтримкою JavaScript, AJAX, сеансів, cookie і редиректів. Сервіс використовує технологію самонавчання і здатний розпізнати складні документи в мережі, після чого генерує вихідний файл у тому форматі, який потрібний користувачеві. ParseHub існує окремо від вебзастосування в якості програми робочого столу для Windows, Mac OS X і Linux. Програма дає безкоштовно п'ять пробних пошукових проєктів. Тарифний план Преміум за 89 доларів дозволяє 20 проєктів і обробку 10 000 вебсторінок за проєкт. ParseHub добре підходить для початківців і невеликих проєктів, але може виявитися недостатньо потужним для масштабного або складного скрейпінгу.

VisualScraper [4] є програмним засобом для парсингу великих об'ємів інформації з мережі. Даний сервіс видобуває дані з декількох вебсторінок і синтезує результати в режимі реального часу, при цьому дані можна експортувати в формати CSV, XML, JSON і SQL. Користуватися і управляти веб-даними допомагає простий інтерфейс типу point and click. VisualScraper пропонує пакет з обробкою більше 100 000 сторінок з мінімальною вартістю 49 доларів в місяць. Є безкоштовне застосування, схоже на Parsehub, доступне для Windows із можливістю використання додаткових платних функцій.

Spinn3r [1] дозволяє парсити дані з блогів, новинних стрічок, новинних каналів RSS і Atom, соціальних мереж. Spinn3r має «оновлюваний» API, який робить 95% роботи по індексації. Це припускає вдосконалений захист від спаму і підвищений рівень безпеки даних. Spinn3r індексує контент, як Google, і зберігає витягнуті дані у файлах формату JSON. Інструмент постійно сканує мережу і знаходить оновлення потрібної інформації з безлічі джерел, користувач завжди має оновлювану в реальному часі інформацію. Консоль адміністрування дозволяє управляти процесом дослідження; є повнотекстовий пошук. Spinn3r робить фокус на медіаконтенті, він оптимізований для збору даних із новинних сайтів, блогів, соціальних медіа та RSS-стрічок, при цьому менш ефективний для збору інших типів даних.

80legs [5] представляє собою гнучкий вебінструмент парсингу сайтів, який можна достатньо точно підлаштувати під потреби користувача, при цьому сервіс є дуже потужним, він справляється з дуже великими обсягами даних і має функцію негайного витягання. Клієнтами 80legs є такі гіганти як MailChimp і PayPal. Опція «Datafiniti» дозволяє знаходити дані якнайшвидше, що забезпечує високоефективну пошукову мережу. Сервіс пропонує безкоштовний пакет – 10 000 посилань за сесію, який можна оновити до пакету INTRO за 29 доларів в місяць, що збільшує кількість посилань до 100 000 за сесію. 80legs підходить для масштабних, ресурсомістких завдань, але вимагає технічної підготовки та не є оптимальним для невеликих або простих проєктів.

Scraper [1] є розширенням для Chrome з обмеженими функціями парсинга даних, але воно корисне для онлайн-досліджень і експортування даних в Google Spreadsheets. Цей інструмент призначений як для новачків, такі для експертів, які можуть скопіювати дані у буфер обміну або сховище у вигляді електронних таблиць, використовуючи OAuth. Scraper – це безкоштовний інструмент, що працює прямо у браузері й автоматично генерує XPath для визначення URL, які треба перевірити. Сервіс досить простий: він не має повної автоматизації або пошукових ботів, як Import або Webhose, але це можна розглядати як перевагу для новачків, оскільки його не доведеться довго налаштовувати, щоб отримати потрібний результат. Scraper доцільно використовувати для простого та швидкого вилучення даних, але він не підходить для складних або масштабних проєктів.

OutWit Hub [6] – це доповнення Firefox з десятками функцій видобування даних, що може автоматично переглядати сторінки і зберігати інформацію у необхідному користувачеві форматі. Це один з найпростіших безкоштовних вебінструментів по збору даних, що не вимагають спеціальних знань в написанні кодів. OutWit Hub підходить для поміркованих завдань зі скрейпінгу, але може бути обмежений при роботі з великими або складними сайтами.

Аналіз існуючих готових сервісів показав, що доцільною є реалізація за допомогою фреймворку власного парсера, який включав би найчастіше затребуваний функціонал. Програмувати парсери самостійно можна за допомогою спеціальних бібліотек, що існують для мов програмування Python, JavaScript, Java. Бібліотеки на Python надають безліч ефективних і швидких функцій для парсингу [7]. Багато з цих інструментів можна підключити до готового застосування у форматі API для створення краулерів, що налаштовуються, а відкритий код мають наступні проєкти: BeautifulSoup, Selenium, Lxml. Для JavaScript теж існують готові бібліотеки для парсингу із зручними функціональними API: Cheerio, Osmosis, Apify SDK. У Java реалізовані різні інструменти і бібліотеки, а також зовнішні API, які можна використати для парсингу: Jsoup, Jaunt, HTMLUnit.

Огляд вищеперелічених бібліотек та фреймворків показав, що найбільш перспективною є розробка парсера за допомогою фреймворків Selenium та Selenide на базі мови програмування Java, при цьому останнім часом в проєктах частіше використовують інструмент Selenide замість Selenium Web Driver. Для остаточного вибору засобу розробки було проведено порівняльний аналіз роботи з фреймворками Selenium та Selenide [8].

Selenium є портативним фреймворком для автоматизації вебдрайверів, що надає інструменти для тестування вебзастосунків. Крім того, Selenium Testing Framework поставляється з предметно орієнтованою мовою (Selenese), що дозволяє писати тести на декількох мовах програмування: Groovy, C#, Java, PHP, Perl, Python, Scala і Ruby. Перевага таких тестів полягає в тому, що їх можна запускати в сучасних веббраузерах, і це дозволяє проводити тестування на різних операційних системах, таких як Windows, macOS і Linux. Серед можливостей даного фреймворку слід зазначити крос-браузерну автоматизацію та автоматизацію мобільних браузерів і нативних застосунків. Він пропонує низькорівневі API для детального управління браузером та підходить для створення інструментів автоматизації, таких як FluentLenium, Thucydides, Watir-webdriver. Selenium – велику спільноту та безліч ресурсів для навчання, є основою для багатьох інших інструментів автоматизації, але його використання вимагає детального знання роботи WebDriver та тайм-менеджменту. Selenium підходить для загальної автоматизації браузерів і тестування специфічних сценаріїв, але він не забезпечує вбудованих механізмів для роботи з динамічним контентом. Selenium надає широкі можливості для створення тестових рішень, але вимагає більше зусиль для управління тестами.

Selenide побудований на основі Selenium та спеціалізується на спрощенні автоматизації UI-тестів. Даний фреймворк інтегрується з Selenium WebDriver, має простий синтаксис для взаємодії з елементами сторінки та орієнтований на написання лаконічного коду. Він може вирішувати проблеми динамічного контенту та таймаутів за допомогою інтелектуального очікування, а також забезпечує високоабстраговані API. Selenide обирають, коли потрібні швидкі, стабільні та легко підтримувані UI-тести, адже даний фреймворк спрощує процес тестування завдяки вбудованим рішенням для поширених проблем (таймаути, Ajax).

За результатами проведеного аналізу ефективності парсингу сайтів було зроблено вибір на користь Selenid, оскільки спеціально розроблений для тестування вебзастосунків і широко відомий як інструмент автоматизації веббраузера, а також забезпечує підтримку крос-браузерної автоматизації, автоматизації нативних застосунків, автоматизації мобільних браузерів тощо.

Метою роботи є дослідження автоматизації отримання даних із сайтів, які є різними за характером, за допомогою парсера, що створений за бази фреймворку Selenid та працює за модифікованою технологією.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі було розроблено систему, що отримує дані з сайту за допомогою парсингу. Для реалізації проекту використовується наступний стек технологій: СУБД PostgreSQL, фреймворк Angular 12, а також Docker, Docker-compose, Gradle, Selenid, Node.js, Npm, Kafka; мови програмування Java 11 та Python. Angular — один з найпопулярніших і сучасних фреймворків (бібліотек) JavaScript, що розвивається Google. За допомогою нього можна швидко створювати складні й динамічні інтерфейси на сайтах. Docker – програмне забезпечення для автоматизації розгортання і управління застосунками в середовищах з підтримкою контейнеризації, контейнеризатор застосунків.

Схему взаємодії програмних модулів додатку наведено на рисунку 1.

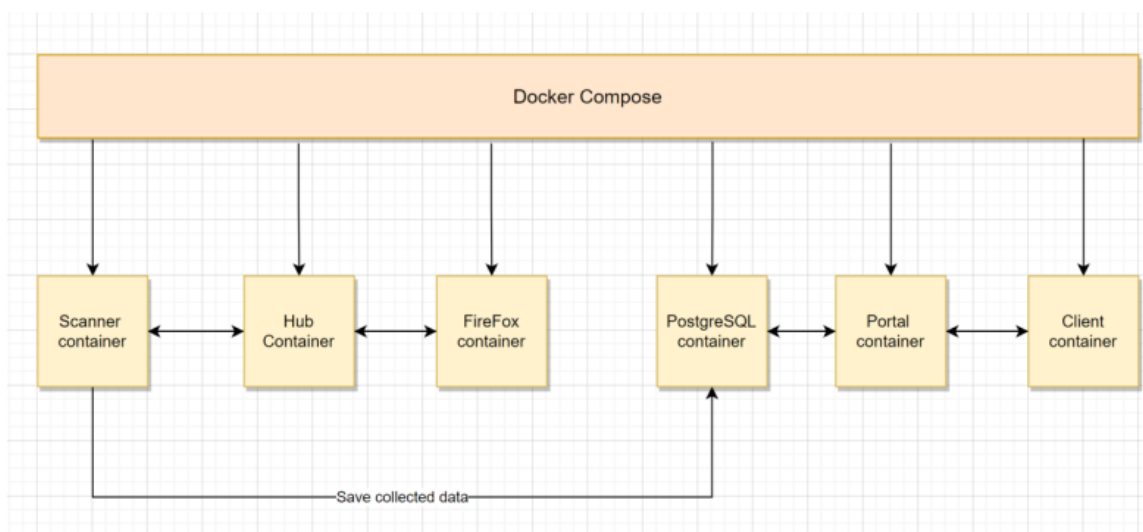


Рис. 1 – Схема взаємодії програмних модулів

Реляційна модель даних наведена на рисунку 2.

Процес виконання додатку передбачає наступні кроки:

- запускається консоль, здійснюється перехід в директорію проекту, виконується команда запуску контейнерів
- сканер-контейнер підключається до hub-контейнеру, а hub-контейнер – до firefox;
- сканер зберігає отримані дані в базі даних;
- клієнт-контейнер робить запит до порталу-контейнеру, який отримує збережену в базі даних інформацію та виводить її в клієнтську частину додатку.

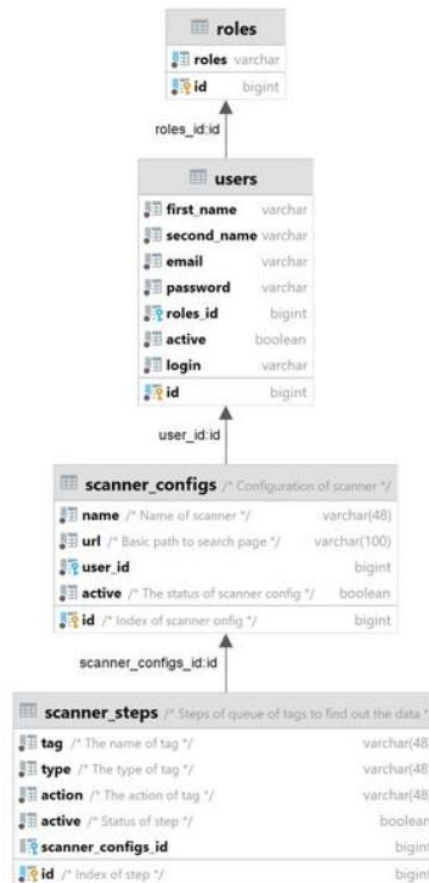


Рис. 2 – Реляційна схема бази даних інформаційно-пошукової системи парсингу сайтів

Програма сканера працює в контейнері докера, незалежно від програми порталу, а знайдена інформація зберігається в БД PostgreSQL (рисунок 3).

```

    Hub
    to org.seleniumhq.jetty9.util.log.StdErrLog
    hub | 08:39:24.105 INFO [Hub.start] - Selenium Grid hub is up and run
    ning
    hub | 08:39:24.107 INFO [Hub.start] - Nodes should register to http://
    /172.21.0.2:4444/grid/register/
    hub | 08:39:24.107 INFO [Hub.start] - Clients should connect to http:
    //172.21.0.2:4444/wd/hub
    hub | 08:39:37.234 INFO [DefaultGridRegistry.add] - Registered a node
    http://172.21.0.3:5555
    hub | 08:39:57.523 INFO [RequestHandler.process] - Got a request to c
    reate a new session: Capabilities {acceptInsecureCerts: true, browserN
    ame: firefox, version: }
    hub | 08:39:57.529 INFO [TestSlot.getNewSession] - Trying to create a
    new session on test slot {server:CONFIG_UUID=16c94ffd-3293-48a9-bd65-
    fd78097e8be5, seleniumProtocol=WebDriver, browserName=firefox, maxInst
    ances=2, moz:firefoxOptions={log={level=info}}, platformName=LINUX, ve
    rsion=88.0, applicationName=, platform=LINUX}

    Firefox
    d: "/usr/bin/firefox" "--marionette" "--foreground" "--no-remote" "--profile" "/t
    mp/rust_mozprofilelw7IZa"
    Firefox | [GFX1-]: glxtest: libpci missing
    Firefox | [GFX1-]: glxtest: libEGL missing
    Firefox | [GFX1-]: glxtest: libEGL missing
    Firefox | 1623573598216 Marionette INFO Marionette enabled
    Firefox | console.warn: SearchSettings: "get: No settings file exists, new pr
    ofile?" (new Error("", "(unknown module)"))
    Firefox | 1623573600195 Marionette INFO Listening on port 4177
    Firefox | 1623573600313 Marionette WARN TLS certificate errors
    will be ignored for this session
    Firefox | 08:40:00.342 INFO [ProtocolHandshake.createSession] - Detected dial
    ect: W3C
    Firefox | 08:40:00.386 INFO [RemoteSession$Factory.lambda$performHandshake$0]
    - Started new session b98a0815-6cca-4386-9299-25c355b8cc3e (org.openqa.seleni
    um.firefox.GeckoDriverService)

    Scanner
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Added connection org.postgresql.jdbc.PgConnection@3e
    5f95b3
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Added connection org.postgresql.jdbc.PgConnection@30
    987c08
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Added connection org.postgresql.jdbc.PgConnection@34
    a7fec3
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Added connection org.postgresql.jdbc.PgConnection@71
    a57633
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - After adding stats (total=5, active=1, idle=4, waiti
    ng=0)
    scanner | INFO o.s.o.j.LocalContainerEntityManagerFactoryBean - Initialized JPA EntityManagerFactory for persistence u
    nit 'default'
    scanner | INFO o.s.s.c.ThreadPoolTaskScheduler - Initializing ExecutorService 'taskScheduler'
    scanner | INFO dplatonov.scanner.ScannerApplication - Started ScannerApplication in 5.749 seconds (JVM running for 6.66
    )
    scanner | INFO dplatonov.scanner.Parser - Start download HTML
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Pool stats (total=5, active=0, idle=5, waiting=0)
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Fill pool skipped, pool is at sufficient level.
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Pool stats (total=5, active=0, idle=5, waiting=0)
    scanner | DEBUG com.zaxxer.hikari.pool.HikariPool - HikariPool-1 - Fill pool skipped, pool is at sufficient level.
    
```

Рис. 3 – Консоль запуску та роботи частин сканеру: Hub, FireFox, Scanner

Додаток Portal працює у контейнері докера, незалежно від програми сканера. Головна сторінка містить таблицю зі сканерами, кожному з яких користувачем задаються умови пошуку та параметри роботи сканера (рисунок 4).

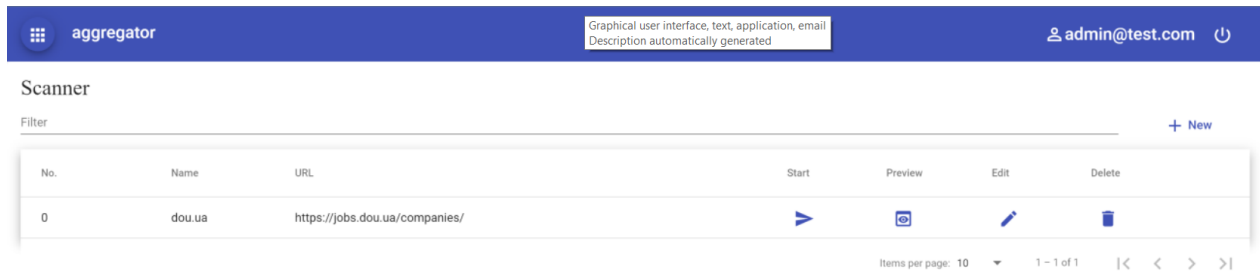


Рис. 4 – Головна сторінка системи

Для створення нового сканера авторизований користувач задає ім'я сканера та базову URL-адресу для пошуку і ланцюгу подій для доступу до потрібних даних. Для створення ланцюга подій (рисунок 5) необхідно зазначити назву тегу, його клас, а також дію, яку необхідно буде виконати (наприклад, натискання кнопки).

New Scanner Configs

Enter Scanner Name *

GitHub

Enter URL *

https://github.com/

Tag	Type	Action	Value	Delete
Enter tag *	Enter type *	Enter type *		
/html/body/div[1]/div[1]/hexpath		click	Enter type	[Delete icon]
Enter tag *	Enter type *	Enter type *		
/html/body/div[1]/div[1]/hexpath		click	Enter type	[Delete icon]
Enter tag *	Enter type *	Enter type *		
/html/body/div[1]/div[1]/hexpath		click	Enter type	[Delete icon]
Enter tag *	Enter type *	Enter type *		
/html/body/div[1]/div[1]/hexpath		scan	Enter type	[Delete icon]

Items per page: 5 1 - 4 of 4 [Navigation icons]

+ Add new Step to Queue

Рис. 5 – Створення ланцюгу подій

З наведеного на рисунку 4 прикладу налаштувань видно, що сканер повинний буде перейти за URL: https://jobs.dou.ua/companies/ та знайти на HTML сторінці ланцюг тегів, що задані в чіткій послідовності із типом class: l-items; l-company; cn a; city; descr;. Останній тег має містити текст, який шукатиме парсер.

Для подальшого аналізу ефективності роботи сканера із обраними налаштуваннями пошуку та налаштуваннями самого парсера зручною опцією є експорт отриманих результатів у файл у форматах csv та xls (рисунк 6).

Java jobs from work.ua

Filter

No.	Start Date	Finish Date	Value
0	2022-12-13 06:11:35	2022-12-13 06:12:15	Відгукнутися Зберегти Ще Вакансія від 13 грудня 2022 Middle full stack developer (Java, JavaScript, ...
1	2022-12-13 06:11:35	2022-12-13 06:12:15	Відгукнутися Зберегти Ще Вакансія від 13 грудня 2022 Java developer TAC VIP фінанси, банки, страхува...

Items per page: 5 1 - 2 of 2

CSV

Рис. 6 – Експорт отриманих сканером даних у окремий файл

У рамках даної роботи було проведено дослідження парсингу даних з різних сайтів з використанням розробленого парсера Aggregator.

Для прикладу було поставлено задачу отримати дані по вакансіях з сайтів www.work.ua, www.jobs.dou.ua. Під час дослідження складності видобутку даних розробленим авторами парсером, аналізували кількість кроків, яка необхідна для виконання поставленого завдання для кожного з обраних сайтів. Для цього було створено два сканери з різними налаштуваннями за тегами та за переліком подій (рисунки 7-8).

Edit Scanner Configs

Enter Scanner Name *

Java jobs from work.ua

Enter URL *

<https://www.work.ua/>

Tag	Type	Action	Value	Delete
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/header/section/c	xpath	click	Enter value	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/header/section/c	xpath	insert	java	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/header/section/c	xpath	clear	Enter value	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
		pause	10	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/header/section/c	xpath	click	Enter value	

Items per page: 5 1 - 5 of 13

+ Add new Step to Queue

✓

✗

Рис. 7 – Налаштування сканера по www.work.ua

Edit Scanner Configs

Enter Scanner Name *

Java jobs from dou.ua

Enter URL *

https://dou.ua/

Tag	Type	Action	Value	Delete
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/div[1]/header/ul/	xpath	click	Enter value	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/div[2]/div[1]/div[1]	xpath	click	Enter value	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/div[2]/div[1]/div[1]	xpath	insert	java	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/div[2]/div[1]/div[1]	xpath	click	Enter value	
Enter tag	Enter type	Enter action	Enter value	
/html/body/div[2]/div[2]/div[1]	xpath	click	Enter value	

Items per page: 5 1 - 5 of 11

+ Add new Step to Queue

Рис. 8 – Налаштування сканера по www.jobs.dou.ua

Іншим параметром складності роботи алгоритму є кількість кліків, що здійснюється: чим більше кліків, тим складніше виконати видобуток даних. Кожний клік – це новий html-запит, який збільшує час виконання роботи парсера, тому що зажить від швидкості з'єднання, яке складно прогнозувати в теперішніх умовах.

Сформовані в результаті роботи сканерів файли, що містять видобуті з сайтів дані, наведені на рисунках 9-10.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Crated date	Start time	End time	Name	Url	Tags		Created by	1st modify date	Modify by
1							Вакансія від 22 листопада 2022 Middle full stack developer (Java, JavaScript, angular 2+) 110 000 грн Люкс Ассіст IT Дистанційна робота Повна зайнятість. Досвід роботи від 1 року. Вакансію зараз переглядає 1 шукач. Відгукнуться на вакансію, щоб бути серед перших! Отримати вакансію Компанія «Люкс-Ассіст» шукає fullstack розробника для проекту для міжнародної страхової компанії, з якою співпрацюємо вже більше 4-х років. Кількість проектів зростає, тому потрібен ще один фахівець. Робота в дружелюбній команді! Обов'язково потрібний вільний усякий рівень володіння англійською мовою. Вимоги: • Java • JavaScript (angular 2+) • PostgreSQL SQL (не обов'язково, але буде плюсом) Умови праці: • повний робочий день • віддалена робота • оплачувані відпустки та лікарняні • оплата праці 90000-110000 гривні/міс. Чекаємо на ваше резюме			
2	11/22/2022 11:39PM	11/22/2022 1:00AM	11/22/2022 1:05AM	Java jobs from work.ua	https://www.work.ua/	<class="form-control jobseeker-search">insert="java"><class="btn btn- search">click;<class="card card- hover card-visited wordwrap job- link">click;repeat,<class="pagination hidden-xs",class="no- style">click;<class="card wordwrap">scan;				

Рис. 9 – Вихідний файл даних з парсингу сайту www.work.ua

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Created date	Start time	End time	Name	Url	Tags		Created by	modify date	Modify by
2	11/22/2022 11:39PM	11/22/2022 1:00AM	11/22/2022 1:10AM	Java jobs from dou.ua	https://jobs.dou.ua/	<				

Рис. 10 – Вихідний файл даних з парсингу сайту www.jobs.dou.ua

Проаналізовано результати виконання парсингу обох сайтів. Час виконання сканування сайтів склав 5 хвилин для www.work.ua та 10 хвилин для www.jobs.dou.ua. Загальна кількість вакансій на www.work.ua в категорії «ІТ, комп'ютери, інтернет» – 4220, на www.jobs.dou.ua – 4150.

Для виведення 14 вакансій по ключовому слову «java» з сайту www.work.ua для сканера потрібно було виконати 17 ітерацій, 2 з яких – циклічні ітерації з повтором по 6 і поверненням на одну сторінку, а також 3 теги. Усього сканер виконав 63 дій.

Для виведення 14 вакансій по ключовому слову «java» з сайту www.jobs.dou.ua для сканера потрібно було виконати 8 ітерацій, 1 з яких – циклічна з повтором 13 разів і поверненням на одну сторінку, а також 3 теги. Усього сканер виконав 59 дій.

Для порівняння з відкритих джерел було взято дані про швидкість роботи двох парсерів, розроблених на C# та на ANTLR відповідно, а саме результати з тестувань двох проєктів: CoreFX-1.0.0-rc2 та Roslyn-1.1.1 із однаковими параметрами (лексер 12%; парсер – 88%). Завдання з обробки 7329 файлів із загальною кількістю рядків 2 286 274 та загальною кількістю символів 91 132 116 парсер Roslyn виконав за 4 секунди, а парсер ANTLR – за 25 секунди. Завдання з обробки 6527 файлів із загальною кількістю рядків 1 967 672 та загальною кількістю символів 74 319 082 парсер Roslyn виконав за 3 секунди, а парсер ANTLR – за 16 секунд (рисунк 11).

Сканування парсером Aggregator, розробленим в рамках даної роботи, проводиться по заголовках та по тегах. У проведеному дослідженні швидкість підключення є нестабільним показником, який за власними замірами склав 1 сек. для сайту www.work.ua та до 1,5 сек. для сайту www.jobs.dou.ua. Для сканування сайту www.work.ua час на підключення склав: $63 \cdot 1 = 63$ сек. Враховуючи загальний час 5 хв. = 300 сек., сумарно на обробку було витрачено $300 - 63 = 237$ сек., при цьому на обробку однієї операції – $237/63 = 3,76$ сек. Для сканування сайту www.jobs.dou.ua час на підключення склав $59 \cdot 1,5 = 88,5$ сек. Враховуючи загальний час 10 хв. = 600 сек., сумарно на обробку витрачено $600 - 88,5 = 511,5$ сек., при цьому на обробку однієї операції – $511,5/59 = 8,67$ сек. (рисунки 11-12).

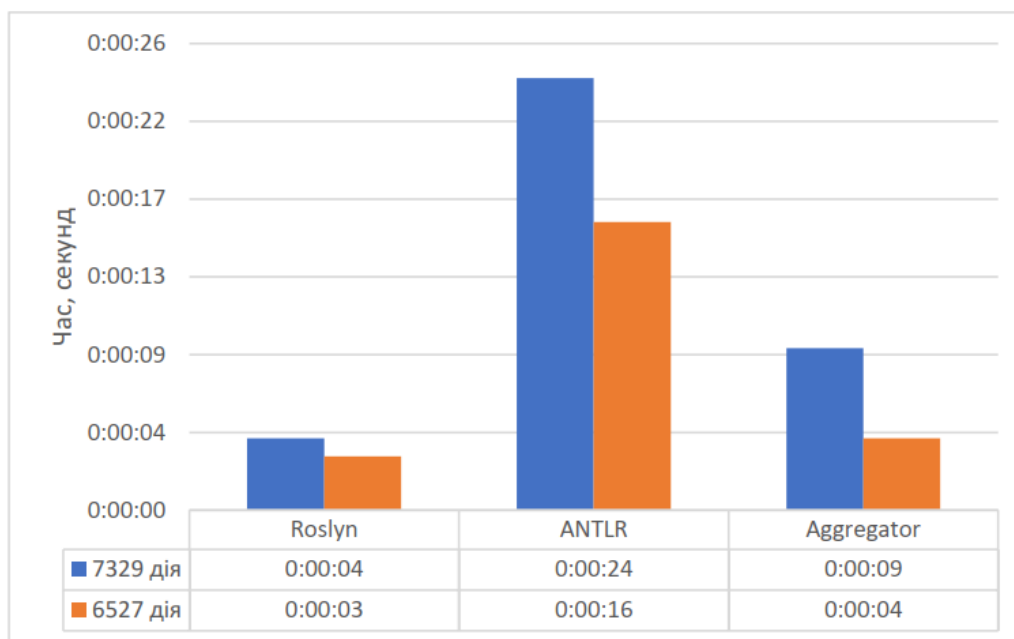


Рис. 11 – Порівняння роботи розробленого парсера та інших відомих парсерів

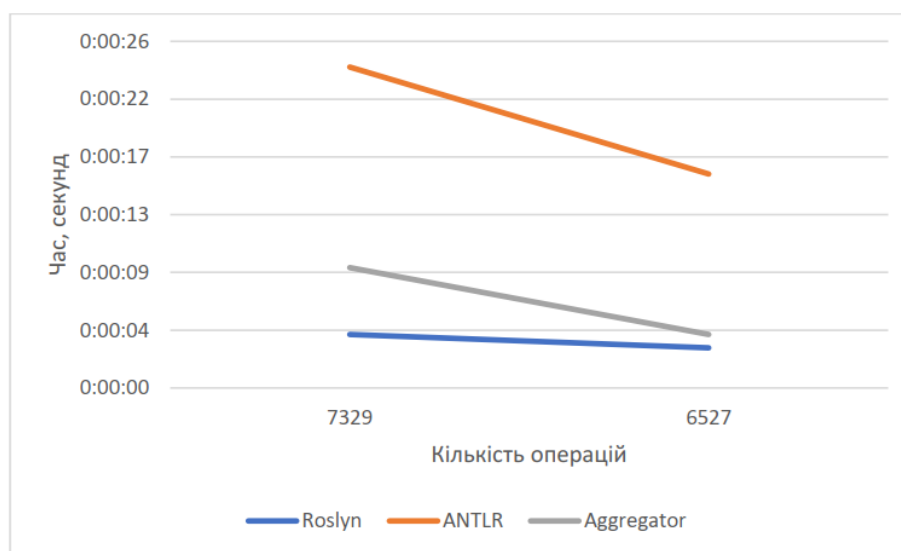


Рис. 12 – Залежність часу роботи парсера від кількості операцій

Результати дослідження показали, що розроблений парсер Aggregator працює на ряду з розглянутими парсерами і має прямопропорційну залежність часу виконання від кількості проведених операцій. Хоча Aggregator не може конкурувати з такими гігантами, як Roslyn, проте його все ж можна використати для парсингу, оскільки його швидкість досить висока і складає від 3,23 до 8,67 секунд (у середньому 5,95 секунди), що лише в 1,98 разів повільніше за корпоративно розроблені парсери. Зважаючи на нестабільне інтернет-підключення, отриманий результат є прийнятним, що доводить ефективність роботи створеного парсера для поставлених умов.

Висновки

Таким чином, розроблено інформаційну систему парсингу сайтів. Вебдодаток розміщений на хостингу: <https://github.com/BearClumsy/aggregator> та є доступним в будь-який час доби через браузер. У роботі докладно проаналізовано 10 існуючих парсерів, виділено їхні переваги та недоліки, що дозволило поставити задачу для розробки власного парсера.

Основними функціональними можливостями розробленого вебдодатку є: додавання та редагування налаштувань сканерів, редагування налаштувань сканеру, отримання інформації поза заданими критеріями пошуку, формування звітів та експортування отриманих даних.

Для розробки використано наступний стек технологій: СУБД Postgres SQL, мови програмування Java 11 та Python, фреймворки Angular 12, Node.js, Npm, а також засоби з автоматизації роботи із проектом Docker, Docker-compose, Gradle, Selenide.

Розроблений парсер Aggregator працює на ряду з розглянутими парсерами і має прямопорційну залежність часу виконання від кількості проведених операцій. Швидкість його роботи складає від 3,23 до 8,67 секунд, що в середньому становить 5,95 секунд, що лише в 1,98 разів повільніше за відомі корпоративні додатки для парсингу статичного тексту. Зважаючи на те, що запропонований парсер використовується для сканування вебсторінок, а умови використання передбачали нестабільне інтернет-підключення, отриманий результат є прийнятним, а робота створеного парсера є ефективною.

Перелік використаних джерел:

1. Ratra R., Gulia P. Big Data tools and techniques: a roadmap for predictive analytics. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2009. Vol. 9. Iss. 2. Pp. 4986-4992. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijeat.B2360.129219>.
2. Tomar R.S. A Study on Web Scraping. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2020. Vol. 8. Iss. 6. Pp. 1820-1824. DOI: <https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2019.0806020>.
3. Ateeq W. M. B., Al-Khalifa H. S. Intelligent framework for detecting predatory publishing venues. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 20582-20618. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250256>.
4. EasySpider: EasySpider: A No-Code Visual System for Crawling the Web / Wang N., Feng W., Yin J., Ng S.-K. *WWW '23 Companion : Companion Proceedings of the ACM Web Conference 2023*, Austin, TX, USA, 30 April - 4 May 2023. Pp. 192-195. DOI: <https://doi.org/10.1145/3543873.3587345>.
5. A classification framework for data marketplaces / Stahl F., Schomm F., Vossen G., Vomfell L. *Vietnam Journal of Computer Science*. 2016. Vol. 3. Pp. 137-143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40595-016-0064-2>.
6. Kirichenko L., Radivilova T., Carlsson A. Detecting cyber threats through social network analysis: short survey. *SocioEconomic Challenges*. 2017. Vol. 1. Iss. 1. Pp. 20-34. DOI: <https://doi.org/10.21272/sec.2017.1-03>.
7. Exploring Web Scraping with Python / Sasi A., Deep A., Kumar K., Birla V. *Machine Intelligence and Smart Systems : Proceedings of the I International Conference*, Gwalior, India, 24-25 September 2020. Pp. 287-296. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4893-6_26.
8. Selenide. Concise UI tests in Java. URL: <https://selenide.org/documentation/selenide-vs-selenium.html> (дата звернення: 28.08.2024).

References:

1. R. Ratra, and P. Gulia, «Big Data tools and techniques: a roadmap for predictive analytics», *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 9, iss. 2, pp. 4986-4992, 2009. doi: 10.35940/ijeat.B2360.129219.
2. R.S. Tomar, «A Study on Web Scraping», *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 8, iss. 6, pp. 1820-1824, 2020. doi: 10.15662/IJAREEIE.2019.0806020.
3. W.M.B. Ateeq, H.S. Al-Khalifa, «Intelligent framework for detecting predatory publishing venues», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 20582-20618, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3250256.
4. N. Wang, W. Feng, J. Yin, and S.-K. Ng, «EasySpider: EasySpider: A No-Code Visual System for Crawling the Web», in *Proc. ACM Web Conference 2023*, USA, 2023, pp. 192-195. doi: 10.1145/3543873.3587345.
5. F. Stahl, F. Schomm, G. Vossen, and L. Vomfell, «A classification framework for data marketplaces», *Vietnam Journal of Computer Science*, vol. 3, p. 137-143, 2016. doi: 10.1007/s40595-016-0064-2.

6. L. Kirichenko, T. Radivilova, and A. Carlsson, «Detecting cyber threats through social network analysis: short survey», *SocioEconomic Challenges*, vol. 1, iss. 1, pp. 20-34, 2017. doi: 10.21272/sec.2017.1-03.
7. A. Sasi, A. Deep, K. Kumar, and V. Birla, «Exploring Web Scraping with Python», in Proc. I Int. Conf. «Machine Intelligence and Smart Systems», Gwalior, India, 2020, pp. 287-296. doi: 10.1007/978-981-33-4893-6_26.
8. Selenide. Concise UI tests in Java. [Online]. Available: <https://selenide.org/documentation/selenide-vs-selenium.html>. Accessed on: August 28, 2024.

Стаття надійшла 15.09.2024

Стаття прийнята 10.10.2024

УДК 004.4:004.94

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321181

© П'ятикоп О.Є.¹, Гніденко В.А.², Воротнікова З.Є.³

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ОСОБИСТИХ ВИТРАТ

У сучасному світі все частіше використовуються електронні платіжні системи, мобільні додатки для платежів і цифрові банківські послуги, створюючи попит на більш точні та зручні інструменти для управління особистими витратами. Це дослідження представляє розробку інтелектуальної системи для аналізу та прогнозування особистих витрат, інтегрованої в кросплатформний мобільний додаток. Дослідження включає аналіз останніх досліджень та публікацій, які підтвердили, що впровадження аналітичних та інтелектуальних систем управління витратами значно підвищує ефективність фінансового контролю та дозволяє своєчасно приймати обґрунтовані рішення. Огляд літератури також показав, що інтеграція таких систем з мобільними додатками є актуальною, затребуваною та забезпечує зручність і доступність в управлінні фінансами. Для розробки мобільного додатку для аналізу та прогнозування особистих витрат на основі історичних даних користувачів були вивчені такі методи прогнозування, як експоненційно зважене ковзне середнє (EWMA) і лінійна регресія. Оцінка цих методів продемонструвала, що EWMA постійно досягає вищої точності, вимірюної WAPE та MAPE. За результатами цього створено прототип мобільного додатку, який використовує історичні дані транзакцій, отримані через відкритий API від Monobank, класифікує витрати за категоріями та застосовує вибраний метод для надання користувачам персоналізованих прогнозів. Щоб забезпечити кросплатформну функціональність, мобільний додаток було розроблено з використанням технологій Dart і Flutter. Розроблений прототип має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із графічною візуалізацією результатів аналізу та прогнозу у вигляді діаграм та графіків. Запропонований підхід сприяє раціоналізації витрат, підвищує ефективність фінансового планування та підвищує фінансову грамотність користувачів.

Ключові слова: аналіз витрат, прогнозування, мобільний додаток, персональні фінанси, експоненційне згладжування, EWMA, лінійна регресія, WAPE, MAPE, Flutter.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-7731-3051, piatykop_o_je@pstu.edu

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-0746-5981, vorotnikova_z_j@pstu.edu

O. Piatykor, V. Hnidenko, Z. Vorotnikova. Mobile application for analyzing and forecasting personal expenses. In the modern world, the volume of financial transactions is increasing daily, and the variety of payment methods and platforms for conducting financial operations is expanding. People are increasingly using electronic payment systems, mobile apps for payments, and digital banking services, creating a demand for more accurate and convenient tools for managing personal expenses. The ability to analyze spending and forecast future financial needs is crucial for ensuring budget stability. This research presents the development of an intelligent system for analyzing and predicting personal expenses, integrated into a cross-platform mobile application. The study includes an analysis of recent research and publications, which confirmed that the implementation of analytical and intelligent systems for expense management significantly improves the efficiency of financial control and allows for timely, informed decision-making. The literature review also showed that the integration of such systems with mobile apps is relevant, in demand, and ensures convenience and accessibility in financial management. To develop a mobile app for analyzing and forecasting personal expenses based on historical user data, forecasting methods such as Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) and linear regression were examined. The evaluation of these methods by expense categories (e.g., food, transportation, leisure) demonstrated that EWMA consistently achieved higher accuracy, measured by WAPE and MAPE. However, forecasting accuracy depends on the availability of sufficient historical data. The prototype of the mobile app was created that uses historical transaction data obtained via an open API from Monobank, classifies expenses by category, and applies the chosen method to provide users with personalized forecasts. To ensure cross-platform functionality, the mobile app was developed using Dart and Flutter technologies, enabling solutions for both iOS and Android. Firebase Firestore and Firebase Authentication were used for data processing and secure information storage. The developed prototype features an intuitive interface with graphical visualizations of analysis and forecast results in the form of charts and graphs. The proposed approach promotes cost rationalization, improves financial planning efficiency, and enhances users' financial literacy.

Keywords: cost analysis, forecasting, mobile app, personal finance, exponential smoothing, EWMA, linear regression, WAPE, MAPE, Flutter.

Постановка проблеми. Управління особистими фінансами є однією з ключових складових повсякденного життя кожної людини. Фінансова грамотність та здатність ефективно розподіляти свої ресурси безпосередньо впливають на добробут та стабільність як окремої особи, так і сімейного бюджету загалом. В умовах постійного зростання варіативності витрат, розвитку електронних платіжних систем та збільшення кількості доступних фінансових інструментів, постає потреба у впровадженні новітніх технологій для оптимізації цього процесу.

Особисті витрати користувача, як предмет аналізу, включають у себе широкий спектр операцій: покупки в магазинах, оплата комунальних послуг, кредити, витрати на дозвілля та подорожі, а також інші види витрат. Для кожного типу витрат характерні свої специфічні закономірності, які можуть змінюватися з часом залежно від економічних обставин, поведінкових звичок користувача та інших факторів. Важливою складовою ефективного управління витратами є можливість прогнозування фінансових операцій, яка дає змогу планувати бюджет і уникати непередбачених витрат у майбутньому [1-3]. Для кожної людини важливим є прогнозування витрат на наступний місяць. Для цього використовуються історичні дані про фінансові операції користувача.

В сучасному світі зараз панує високий рівень адаптації фінансових технологій у цифровому середовищі [4-5]. Широке використання банківських мобільних додатків, інтернет-банкінгу та електронних гаманців створює великі масиви фінансових даних, що можуть бути ефективно використані для аналізу і прогнозування [3, 6, 7]. У цьому контексті традиційні методи фінансового планування, що передбачають ручний облік та аналіз витрат, втрачають свою ефективність. Тому актуальні інтелектуальні системи, здатні аналізувати фінансові операції та надавати рекомендації щодо управління витратами [7-10]. Такі системи базуються на зборі, обробці та аналізі великої кількості даних про транзакції користувачів. Отримана інформація дозволяє створювати

персоналізовані поради для кожного індивідуального користувача. Це стає можливим завдяки використанню інтелектуальних алгоритмів та методів прогнозування, які дозволяють робити висновки про майбутні фінансові події та тенденції [3, 4, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітика витрат коштів є ключовим інструментом для ефективного управління фінансами не лише в державному, але й в приватному секторі. Дослідження показують, що використання автоматизованих систем управління фінансами значно покращує прозорість витрат, допомагає уникати перевитрат і оптимізувати фінансові ресурси згідно з [1]. Використання сучасних аналітичних систем дозволяє не лише контролювати поточні витрати, а й робити прогнози на основі історичних даних, що підтверджує [2-4].

Для ефективної аналітики витрат використовуються різні методи збору даних, включаючи автоматизований облік транзакцій, ERP-системи та спеціалізовані фінансові платформи, як зазначено у [4, 6, 7]. Використання методів прогнозування дозволяє автоматизувати процес виявлення аномалій у витратах, що робить його швидшим та ефективнішим [3, 8, 9]. Аналітика витрат часто базується на методах, що включають статистичні моделі [8, 11].

На сьогодні вже є досвід розробки додатків та платформ, що надають послуги з управління фінансами та пропонують фінансові рекомендації [12-16]. Так автори роботи [12] описують розробку та впровадження адаптивної веб-системи для контролю фінансового бюджету університетів. Запропонована система спрямована покращити запис і обробку фінансових операцій. Їх адаптивна веб-система відстежує всі етапи обробки транзакцій, починаючи з бюджетних розписів, проводить аудит, облік витрат, доходів, вкладів і коштів. Результати опитування показали, що було досягнуто 86,25% задоволеності. Також розробці веб-системи щодо прогнозування бюджету присвячена робота [13]. Авторами пропонується динамічно формувати прогноз на основі історичних даних користувача. Для цього в роботі запропоновано власні моделі та методи. Автори зазначають про середнє збільшення заощаджень в 1,3 рази в порівнянні з кількістю заощаджень без використання розробленого веб-сервісу.

Але на сьогодні актуальним стає інтеграція аналітичних систем з мобільними платформами [5, 6, 14-16]. В роботі [5] досліджується вплив послуг мобільного банкінгу, зокрема програми BSB Mobile, на задоволеність клієнтів і ефективність роботи. Авторами роботи [6] розглядаються перспективи застосування технологій мобільних додатків у функції управління особистими фінансами. Робота [14] дозволяє дослідити, як гейміфікація підвищує мотивацію користувачів, їх намір використовувати програми для управління особистими фінансами та як це полегшує їх впровадження. Автори роблять висновки про доцільність впровадження та поширення мобільних застосунків щодо керування особистими витратами.

Отже, використання мобільних додатків для управління витратами дозволить користувачам отримувати доступ до фінансових даних і контролювати витрати в будь-який час. Така інтеграція підвищить оперативність ухвалення рішень і забезпечить більшу гнучкість у процесі управління особистими фінансами.

Так, робота [15] присвячена розробці прототипу мобільного додатку, основна функція якого – полегшити користувачеві процес управління особистими фінансами. Автори пропонують додаток для керування особистими фінансами, в якому користувачі можуть бачити свою минулу діяльність, записувати поточні транзакції та планувати свої майбутні цілі. Автори зазначають, що їх робота не охоплює зовнішню поведінку, наприклад автоматичну оплату рахунків за кредитною картою. Тому мобільний додаток лише допомагає організувати керування особистими витратами, але не робить прогнозування на основі накоплених даних користувача. Також додаток розроблено під систему Android.

Інший досвід розробки мобільного додатку на базі операційної системи Android для управління особистими фінансами описано в роботі [16]. Додаток надає можливість ведення особистого бюджету, отримання звіту про фінансовий стан за певний період, роботи з витратами та доходами, формування та візуалізації звітів за допомогою діаграм, сканування штрих-кодів. Мобільний додаток розроблено для забезпечення інтеграції з попередньо створеною авторами веб-системою управління особистими фінансами. Автори зазначають, що програма відкрита для майбутніх покращень.

Таким чином, наукова проблематика, пов'язана з розробкою інтелектуальної системи аналізу та прогнозування особових витрат, є надзвичайно актуальною. Вона обумовлена потребою в автоматизованих рішеннях для управління особистими фінансами та оптимізації витрат, що

відповідають вимогам сучасного цифрового суспільства. Вирішення цієї проблеми дозволить підвищити фінансову грамотність користувачів, оптимізувати їх витрати та забезпечити більш ефективне фінансове планування.

Метою роботи є розробка інтелектуальної системи аналізу та прогнозування особистих витрат на основі історичних даних з банківської системи у вигляді кроссплатформеного мобільного застосунку.

Виклад основного матеріалу. Процес аналізу та прогнозування особових витрат у запропонованій інтелектуальній системі складається з кількох ключових етапів, кожен з яких виконує специфічні завдання для забезпечення точності прогнозування і аналітичної обробки даних:

- збір і обробка даних транзакції з банківської системи;
- моделювання та дослідження методів прогнозування для різних категорій витрат;
- впровадження методів прогнозування у мобільний застосунок.

Кожен з цих етапів є важливим компонентом загального процесу обробки даних і забезпечує ефективну роботу інтелектуальної системи рекомендацій.

Перший етап було виконано через імпорт історії особових витрат за останні півроку за допомогою відкритого API від Monobank. Для подальшого аналізу та формування прогнозу всі витрати були поділені на категорії: їжа, таксі, ресторани, перекази на карту. За своїм характером отримані фінансові дані відповідають типу часових рядів, що не мають тренду, тому для подальшого прогнозування варто використовувати моделі згладжування для часових рядів. Отже, для наступного прогнозування були досліджені методи на основі експоненційно зваженого ковзного середнього EWMA та лінійна регресія з методом найменших квадратів.

Експоненційно зважене ковзне середнє (EWMA) – це метод прогнозування часових рядів, що базується на наданні більшої ваги останнім спостереженням, зменшуючи вплив попередніх. На відміну від простого середнього, яке надає рівнозначну вагу всім спостереженням, експоненційне згладжування дозволяє ефективно відслідковувати зміни в даних та адаптуватися до них, що робить його ефективним для короткострокових прогнозів [17].

Розрахунок для простого експоненційного згладжування виконується за виразом (1).

$$F_{t+1} = \alpha x_t + (1 - \alpha)F_t, \quad (1)$$

де F_{t+1} – прогноз на наступний момент часу $t+1$; α – коефіцієнт згладжування (від 0 до 1), x_t – фактичне значення на момент часу t , F_t – прогноз на поточний момент часу t .

Формула (1) показує, що нове прогнозоване значення є середньозваженим минулих прогнозів і фактичного поточного значення, при цьому вага, що надається кожному, залежить від α . При $\alpha = 1$ метод реагує тільки на останнє спостереження (немає згладжування). При $\alpha = 0$ прогноз не оновлюється на основі нових даних (максимальне згладжування).

Лінійна регресія – це один з основних методів прогнозування, що використовується для моделювання залежності між однією залежною змінною (відгук) і однією або кількома незалежними змінними (факторами). Лінійна регресія допомагає встановити математичну модель, за якою можна передбачити значення залежної змінної на основі значень незалежних змінних.

Лінійна регресія припускає, що існує лінійна залежність між змінними, тобто зміна незалежних змінних спричиняє пропорційну зміну залежної змінної. Модель лінійної регресії описується рівнянням прямої (2).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots + b_nX_n, \quad (2)$$

де: Y – прогнозоване значення залежної змінної, $X_1 \dots X_n$ – незалежні змінні (фактори), b_0 – константа (вільний член), що представляє перетин лінії з віссю Y , $b_1, b_2 \dots b_n$ – коефіцієнти регресії, які показують вплив відповідних незалежних змінних на залежну.

Лінійна регресія буде прогнозувати модель на основі тренувальних даних, де вже відомі значення X та Y . За допомогою методу найменших квадратів (OLS), вона знаходить оптимальні коефіцієнти $b_1, b_2 \dots b_n$, які мінімізують різницю між фактичними значеннями залежної змінної і тими, що передбачаються моделлю. Цей метод є зручним для систем прогнозування витрат,

оскільки дозволяє враховувати як короткочасні зміни, так і більш тривалі тренди, адаптуючи прогнози відповідно до нових фінансових даних користувача.

Моделювання обраних методів прогнозування проводилось на основі історичних фінансових даних для кожної категорії витрат. Для оцінки точності прогнозування були використані середня абсолютна помилка у відсотках (MAPE) і зважена абсолютна процентна помилка (WMAPE) [18]. Результати якості прогнозування наведені в таблиці 1. Показники точності наведені як середнє значення для різних категорій витрат. Для різних категорій витрат була різна кількість транзакцій, тому для покращення точності прогнозу треба накопичити більше історичних даних про фінансові операції.

Таблиця 1

Результати оцінки методів прогнозування

Методи	Точність за WMAPE	Точність за MAPE
Лінійна регресія найменших квадратів (OLS)	10.18%	10.49%
Експоненційно зважене ковзне середнє (EWMA)	8.50%	8.94%

Для подальшого дослідження було розроблено прототип мобільного застосунку в середовищі Android Studio, що забезпечує повну підтримку для розробки мобільних додатків на Dart та Flutter. Обрання цих засобів дозволяє створення кросплатформного рішення для iOS та Android з єдиним кодовим базисом. Дані користувачів і транзакцій зберігаються в Firebase Firestore, що гарантує безпечне зберігання і синхронізацію даних в реальному часі. Для автентифікації користувачів використано Firebase Authentication, що забезпечує високий рівень безпеки. Крім цього для зручного та приємного відображення результатів на графіках та розрахунку алгоритмів прогнозування було використано такі бібліотеки:

–firebase_core та firebase_database – забезпечують доступ до Firebase для зберігання та читання даних, використовуються для зберігання історії транзакцій та прогнозованих витрат.

–flutter_chart – бібліотека для побудови графіків і візуалізації результатів прогнозування, що дозволяє користувачу бачити результати у зрозумілому форматі.

–dart:math – стандартна бібліотека для математичних операцій на мові Dart, яка використовується для реалізації алгоритмів лінійної регресії та експоненційного згладжування.

Таким чином, було розроблено інтелектуальну систему аналізу та прогнозування особистих витрат, яка складається з наступних ключових компонентів, що забезпечують зберігання даних, їх обробку та зручну взаємодію користувача:

–Сховище даних. Цей компонент служить основою для зберігання всіх даних користувача, таких як історія транзакцій, дані автентифікації та результати прогнозів. Використовується Firebase, який забезпечує роботу застосунку в реальному часі, що дозволяє користувачам отримувати оновлені фінансові дані і рекомендації без затримок.

–Обробка даних. Цей компонент дозволяє системі збирати детальні дані про транзакції користувачів на основі інтеграції з API банків (ПриватБанк, Монобанк), класифікувати їх за різними категоріями (наприклад, харчування, транспорт, розваги) та використовувати їх для аналізу і прогнозування. Це створює основу для аналізу витрат та виявлення тенденцій у фінансовій поведінці користувача.

–Інтерфейс та візуалізація. Цей компонент надає зручний інтерфейс, що дозволяє користувачам легко взаємодіяти з системою. Він забезпечує доступ до історії витрат, а також до персоналізованих прогнозів і рекомендацій, які допомагають користувачам оптимізувати свої витрати. Результати прогнозів виводяться наочно у вигляді діаграм та графіків. Приклад наведено на рисунку 1. Так користувач може бачити числа похибки, зазначені для кожної категорії витрат, які були прораховані під час прогнозування (рисунок 1а). Також користувач може подивитися деталі прогнозування витрат на майбутній місяць по кожній категорії разом із історією за півроку, наприклад, для їжі на рисунку 1б.

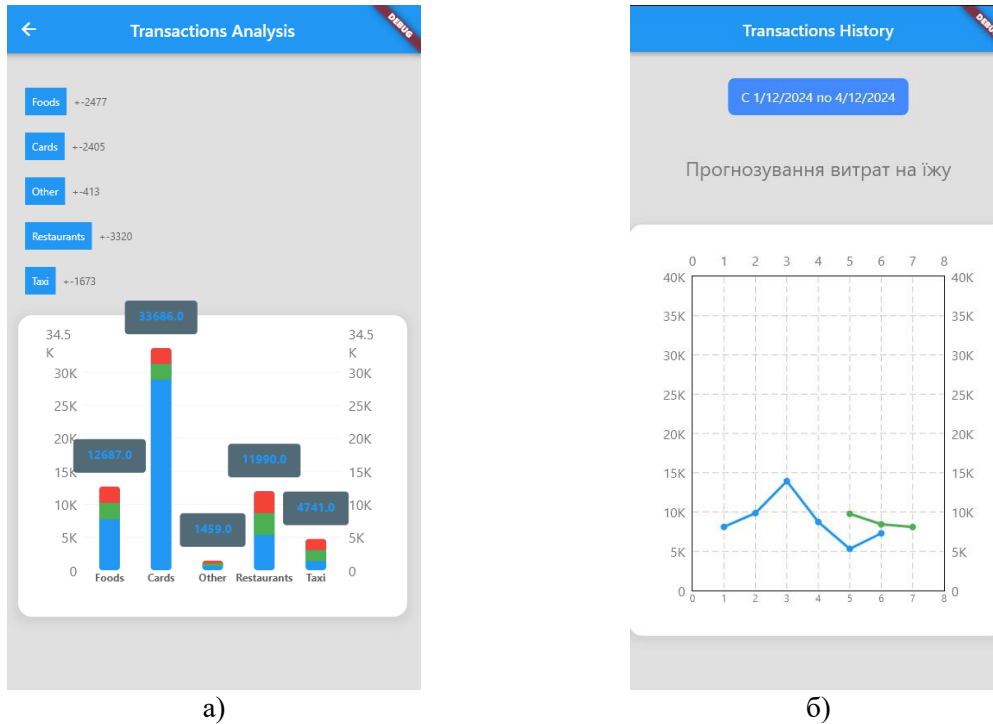


Рис. 1 – Сторінки прогнозування у мобільному застосунку

Отже, запропонований прототип системи надає користувачам зручний інтерфейс для відстеження витрат та отримання порад щодо раціонального управління фінансами. Вона підтримує інтеграцію з банківськими сервісами та платіжними системами, що дозволяє автоматизувати збір та аналіз фінансових даних.

Висновки

У ході дослідження було проаналізовано підходи до управління особовими фінансами та розроблено прототип системи, яка аналізує витрати користувача та надає персоналізовані рекомендації для їх оптимізації. Для цього були вирішені такі завдання:

- дослідження методів прогнозування для різних категорій особистих витрат;
- розробка архітектури програмного забезпечення з інтеграцією Firebase;
- реалізація API для отримання транзакцій з банків, таких як ПриватБанк та Монобанк;
- розробка прототипу мобільного додатку для аналізу та прогнозування витрат із зручним інтерфейсом та візуалізацією.

Прототип системи розроблено за допомогою Dart та Flutter. Завдяки використанню Flutter, застосунок є кросплатформним, тобто працює на різних операційних системах, що розширює його доступність для користувачів на Android та iOS.

Для аналізу витрат досліджувались такі методи, як лінійна регресія та експоненціальне згладжування. Лінійна регресія дозволяє виявляти взаємозв'язки між витратами користувача та факторами, які можуть на них впливати, що допомагає створювати прогнози на основі минулих даних. Експоненціальне згладжування враховує останні зміни у витратах і надає можливість більш точно прогнозувати короткострокові зміни. Для обраної предметної галузі кращі показники точності визначено для методу експоненційного згладжування. Використання цих методів дозволяє системі надавати користувачам обґрунтовані рекомендації, які допомагають краще керувати своїми фінансами.

Перелік використаних джерел:

1. Goyal K., Kumar S., Xiao J. J. Antecedents and consequences of Personal Financial Management Behavior: a systematic literature review and future research agenda. *International Journal of Bank Marketing*. 2021. Vol. 39. No. 7. Pp. 1166-1207. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJBM-12-2020-0612>.

2. Bragg S. *Cost Accounting Fundamentals: Essential Concepts and Examples*. 5th ed. Accounting Tools, 2018. 260 p.
3. When and how big data analytics and work practices impact on financial performance: an intellectual capital perspective from banking industry / A. Hussain et al. *Kybernetes*. 2024. Vol. 53. No. 10. Pp. 3271-3293. DOI: <https://doi.org/10.1108/K-11-2022-1623>.
4. Artificial Intelligence in Accounting and Finance: Challenges and Opportunities / Yi Z., Cao X., Chen Z., Li S. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 129100-129123. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3333389>.
5. The Role Of Mobile Banking In Improving Service Efficiency To Customers In The Digital Era / Helmi S., Trisninawati A., Rianawati D., Wedadjati R. S. *Journal of Information Systems and Management*. 2024. Vol. 2. No. 2. Pp. 14-23. <https://doi.org/10.61978/data.v2i3.285>.
6. Mijić M., Čebić B. Mobile Applications for Personal Finance Management: Technology Acceptance Perspective. *Digital Transformation of the Financial Industry*. Springer, Cham, 2023. Pp 273-295, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-23269-5_16.
7. Prymostka L., Kysil T. Intelligent information systems of the banking sector: General characteristics and information environment. *Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series «Economics»*. 2023. Vol. 10(4). Pp. 43-53. DOI: <https://doi.org/10.52566/msu-econ4.2023.43>.
8. Мінц О. Ю. Методологія моделювання інноваційних інтелектуальних систем прийняття рішень в економіці : монографія. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. 216 с.
9. Pahsa A. Financial technology decision support systems. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2024. Vol. 11. Article 5. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00130-0>.
10. Intellectual technologies and decision support systems for the control of the economic and financial processes / P. I. Bidiuk et al. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2019. Vol. 97. No. 01. Pp. 71-87.
11. Сердюк К., П'ятикоп О. Вибір моделі, що прогнозує індивідуальні навантаження при ходьбі людини. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2021. Вип. 44. С. 60-65. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-44-10>.
12. Design and Implementation of a Responsive Web-based System for Controlling the Financial Budget of Universities / A. Ayah, M. Chira, A. Akeela, A. Maiwan. *Journal of Technology and Informatics (JoTI)*. 2023. Vol. 5. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.37802/joti.v5i1.339>.
13. Писаренко К. О., Оніщенко Т. В., Пригожев О. С. Розробка веб-сервісу динамічного формування прогнозу бюджету в залежності від історії користувача. *Informatics & Mathematical Methods in Simulation*. 2021. Vol. 11. Iss. 4. Pp. 316-330. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v11.no4.316>.
14. Bitrián P., Buil I., Catalán S. Making finance fun: the gamification of personal financial management apps. *International Journal of Bank Marketing*. 2021. Vol. 39. No. 7. Pp. 1310-1332. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJBM-02-2021-0074>.
15. Makalew B. Android Based Personal Finance Management Application: Design and Development. *Engineering, Mathematics and Computer Science (EMACS) Journal*. 2022. Vol. 4. Pp. 5-9. DOI: <https://doi.org/10.21512/emacsjournal.v4i1.8085>.
16. Personal Finance Management Application / Stefanov T., Stefanova M., Varbanova S., Temelkov S. *TEM Journal*. 2024. Vol. 13. Pp. 2066-2075. DOI: <https://doi.org/10.18421/TEM133-34>.
17. Studenmund A. *Practical Guide to Using Econometrics, a Global Edition*. 7th ed. London : Pearson International, 2017. 576 p.
18. *Time Series Analysis: Forecasting and Control* / ed. by E. P. George et al. Hoboken : Published by John Wiley and Sons Inc., 2015. 712 p.

References:

1. K. Goyal, S. Kumar, and J.J. Xiao, «Antecedents and consequences of Personal Financial Management Behavior: a systematic literature review and future research agenda», *International Journal of Bank Marketing*, vol. 39, no. 7, pp. 1166-1207, 2021. doi: 10.1108/IJBM-12-2020-0612.
2. S. Bragg, *Cost Accounting Fundamentals: Essential Concepts and Examples*, 5th ed. Accounting Tools, 2018.

3. A. Hussain, Q.A. Nisar, W. Khan, U.I. Niazi, and M. Malik, «When and how big data analytics and work practices impact on financial performance: an intellectual capital perspective from banking industry», *Kybernetes*, vol. 53, no. 10, pp. 3271-3293, 2024. doi: **10.1108/K-11-2022-1623**.
4. Z. Yi, X. Cao, and Z. Chen, and S. Li, «Artificial Intelligence in Accounting and Finance: Challenges and Opportunities», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 129100-129123, 2023. doi: **10.1109/ACCESS.2023.3333389**.
5. S. Helmi, A. Trisninawati, D. Rianawati, and R.S. Wedadjati, «The Role Of Mobile Banking In Improving Service Efficiency To Customers In The Digital Era», *Journal of Information Systems and Management*, vol. 2, no 2, pp. 14-23, 2024. doi: **10.61978/data.v2i3.285**.
6. M. Mijić, and B. Čebić, «Mobile Applications for Personal Finance Management: Technology Acceptance Perspective», in *Digital Transformation of the Financial Industry*, S. Benković, A. Labus, and M. Milosavljević, Eds., Springer, Cham, 2023, pp. 273-295. doi: **10.1007/978-3-031-23269-5_16**.
7. L. Prymostka, and T. Kysil, «Intelligent information systems of the banking sector: General characteristics and information environment», *Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series «Economics»*, vol. 10(4), pp. 43-53, 2023. doi: **10.52566/msu-econ4.2023.43**.
8. O.Yu. Mints, *Metodolohiia modeliuvannia innovatsiynykh intelektualnykh system pryiniattia rishen v ekonomitsi : monohrafiia* [Methodology for modeling innovative intelligent decision-making systems in economics: monograph]. Mariupol, Ukraine: SHEI «PSTU» Publ., 2017. (Ukr.)
9. A. Pahsa, «Financial technology decision support systems», *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 11, article 5, 2024. doi: **0.1186/s43067-023-00130-0**.
10. P.I. Bidiuk, T.I. Prosiankina-Zharova, O.M. Terentieev, V.A. Lakhno, and O.V. Zhmud, «Intellectual technologies and decision support systems for the control of the economic and financial processes», *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 97, no. 01, pp. 71-87, 2019.
11. K. Serdiuk, and O. Piatyko, «Vybir modeli, shcho prohnozuie indyvidualni navantazhennia pry khodbi liudyny» [«Choosing a model that predicts individual loads during human walking»], *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo – Computer-integrated technologies: education, science, production*, vol. 44, pp. 60-65, 2021. doi: **10.36910/6775-2524-0560-2021-44-10**. (Ukr.)
12. A. Ayah, M. Chira, A. Akeela, and A. Maiwan, «Design and Implementation of a Responsive Web-based System for Controlling the Financial Budget of Universities», *Journal of Technology and Informatics (JoTI)*, vol. 5, pp. 1-7, 2023. doi: **10.37802/joti.v5i1.339**.
13. K.O. Pysarenko, T.V. Onishenko, and O.S. Prygozhev, «Rozrobka veb-servisu dynamichnoho formuvannia prohnozu biudzhetu v zalezhnosti vid istorii korystuvacha» [«Development of web service for dynamic generating a forecast of budget depending on the user's story»], *Informatics & Mathematical Methods in Simulation*, vol 11, issue 4, pp. 316-330, 2021. doi: **10.15276/imms.v11.no4.316**. (Ukr.)
14. P. Bitrián, I. Buil, and S. Catalán, «Making finance fun: the gamification of personal financial management apps», *International Journal of Bank Marketing*, vol. 39, no. 7, pp. 1310-1332, 2021. doi: **10.1108/IJBM-02-2021-0074**.
15. B. Makalew, «Android Based Personal Finance Management Application: Design and Development», *Engineering, Mathematics and Computer Science (EMACS) Journal*, vol. 4, pp. 5-9, 2022. doi: **10.21512/emacsjournal.v4i1.8085**.
16. T. Stefanov, M. Stefanova, S. Varbanova, and S. Temelkov, «Personal Finance Management Application», *TEM Journal*, vol. 13, pp. 2066-2075, 2024. doi: **10.18421/TEM133-34**.
17. A. Studenmund, *Practical Guide to Using Econometrics, a Global Edition*, 7th ed. London, UK: Pearson International Publ., 2017.
18. E.P. George, G.M. Box, G.C. Jenkins, R. Ljung, and G.M. Ljung, Eds., *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Hoboken, USA: John Wiley and Sons Inc. Publ., 2015.

Стаття надійшла 18.10.2023

Стаття прийнята 23.11.2023

**ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНИХ
СИМВОЛІВ РІЗНИХ МОВ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ НЕЙРОННИХ
МЕРЕЖ KAN**

У роботі були проаналізовані найефективніші існуючі методи оптичного розпізнавання символів, які використовують у своїй структурі глибоке навчання нейромереж. У ході аналізу було виявлено, що сучасні архітектури нейромереж, з найкращими показниками точності розпізнавання, мають сталу межу точності. Також було встановлено, що кожна проаналізована архітектура нейромереж містить у своїй структурі багатошаровий перцептрон. Для оптимізації показників розпізнавання нейромереж було запропоновано використовувати мережу Колмогоров-Арнольда як альтернативу для мереж на основі багатошарового перцептрону. Архітектура створеної моделі заснована на двокомпонентному трансформері, перший компонент – візуальний трансформер, що використовується у якості кодера, другий – мовний трансформер, який використовується у якості декодера. Мережа Колмогоров-Арнольда замінює мережу прямого поширення на основі багатошарового перцептрону, у кожному трансформері – кодері та декодері. Поліпшення результатів існуючих нейромереж забезпечується за допомогою трансферного навчання, для чого у створеній моделі використовуються групові раціональні функції, у якості основних елементів мережі Колмогоров-Арнольда, що навчаються. Навчання моделі проводилося на наборах зображень рядків тексту з трьох різних систем письма: алфавітної, абугіда та логографічної; які представлені писемностями: англійської, деванатарі та китайської. В результаті експериментальних досліджень були виявлені високі показники розпізнавання символів для наборів даних китайської та деванатарі, але низькі для англійської писемності, для моделі з мережею Колмогоров-Арнольда. Отримані результати свідчать про нові можливості підвищення надійності і ефективності сучасних систем розпізнавання рукописних текстів.

Ключові слова: оптичне розпізнавання символів, нейромережа, мережа Колмогоров-Арнольда, трансформерна архітектура, трансформер Колмогорова-Арнольда, раціональні функції.

A.V. Serhiienko, E.A. Kolomoichenko. Study of handwritten character recognition algorithms for different languages using the KAN Neural Network Model. The paper analyzed the most effective existing methods of optical character recognition that use deep learning neural networks in their structure. The analysis revealed that modern neural network architectures with the best recognition accuracy indicators have a constant accuracy limit. It was also found that each analyzed neural network architecture contains a multilayer perceptron in its structure. To optimize the recognition performance of neural networks, it was proposed to use the Kolmogorov-Arnold network as an alternative to multilayer perceptron based networks. The architecture of the created model is based on a two-component transformer, the first component is a visual transformer used as an encoder, the second is a language transformer used as a decoder. The Kolmogorov-Arnold network replaces the feedforward network based on a multilayer perceptron, in each transformer – encoder and decoder. Improvement of existing neural network results is ensured through transfer learning, for which group rational functions are used as the main learning elements of the Kolmogorov-Arnold network. The model was trained on sets of images of text

¹ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, kolomoichenko_e_a@pstu.edu

lines from three different writing systems: alphabetic, abugida and logographic; which are represented by the scripts: English, Devanagari and Chinese. As a result of experimental studies, high character recognition rates were found for the Chinese and Devanagari data sets but low for the English script, for the model with the Kolmogorov-Arnold network. The obtained results indicate new possibilities for increasing the reliability and efficiency of modern handwriting recognition systems.

Keywords: *optical character recognition, neural network, Kolmogorov-Arnold network, transformer architecture, Kolmogorov-Arnold transformer, rational functions.*

Постановка проблеми. Розпізнавання рукописних символів (скорочено HWR) є ключовою галуззю досліджень у сфері комп'ютерного зору та штучного інтелекту. Дослідження у галузі HWR спрямовані на створення алгоритмів та систем, здатних автоматично інтерпретувати рукописні символи та перетворювати їх у цифровий формат.

В загальному випадку розпізнавання рукописного тексту поділяється на дві основні категорії: офлайн та онлайн розпізнавання. Офлайн розпізнавання передбачає обробку статичних зображень рукописного тексту. У цьому випадку система розпізнавання не має доступу до інформації про динаміку написання символів, такої як траєкторія руху пера або швидкість письма [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]. Ці динамічні характеристики можуть допомогти розрізнити схожі за формою символи або вирішити неоднозначності, які виникають при аналізі лише статичних зображень і тому процес офлайн розпізнавання є більш складним. У роботі було прийнято рішення досліджувати методи офлайн розпізнавання, через їх ширше застосування та більшу алгоритмічну складність.

Сучасний стан області досліджень розпізнавання рукописного тексту базується на застосуванні машинного навчання [2] та глибокого навчання нейромереж [3], що являють собою моделі багат шарового перцептрона, зокрема згорткових нейронних мереж, які забезпечують автоматичне виділення ознак та демонструють значно кращу точність порівняно з традиційними алгоритмами [4].

Нові дослідження у сфері розпізнавання рукописних символів спрямовані на підвищення точності, ефективності та універсальності існуючих систем, з особливим акцентом на адаптивність до мов, які ще не мають високого рівня розпізнавання у існуючих системах, і до різноманітних стилів письма.

Метою даної роботи є аналіз та вдосконалення сучасних алгоритмів розпізнавання рукописних символів різних мов з використанням інноваційних моделей нейронних мереж Колмогорова-Арнольда.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі методів розпізнавання рукописних символів доцільно зосередитись на сучасних ефективних методах, що засновані на штучному інтелекті та машинному навчанні. Зокрема, найкраще себе зарекомендували методи на основі навчання нейромереж, що базуються на багат шаровому перцептроні, але з різною архітектурою побудови мережі.

Загальний підхід при роботі з методами на основі машинного навчання нейромереж включає кілька ключових етапів. Перш за все, здійснюється збір та підготовка великих та різноманітних наборів даних рукописних символів обраних мов, що забезпечує якісне навчання моделей. Наступним етапом є попередня обробка даних, яка включає нормалізацію зображень, видалення шуму, вирівнювання та інші техніки для покращення якості вхідних даних. Після цього проводиться вибір архітектури моделі, де визначаються найбільш підходящі структури моделі для машинного навчання. Далі слідує етап навчання моделі, під час якого використовуються алгоритми оптимізації для налаштування параметрів моделі на основі підготовлених даних з метою мінімізації помилок розпізнавання. Після навчання модель проходить етап оцінки та валідації, де тестується на окремих вибірках даних для оцінки її точності, здатності до узагальнення та стійкості до різних варіацій рукопису. Заключним етапом є оптимізація та налаштування моделі, що включає внесення корективів до архітектури або процесу навчання для покращення продуктивності та адаптивності до специфічних вимог задачі [5]. Такий системний підхід дозволяє створювати гнучкі та високоефективні системи розпізнавання рукописних символів, здатні обробляти різноманітні мовні та стилістичні варіації, що є ключовим фактором успішного впровадження в реальні застосунки.

Найбільш поширеним методом для розпізнавання рукописних символів є використання нейромереж з архітектурою CNN-LSTM, де згорткові шари (CNN) ефективно виділяють локальні ознаки зображень, а операція пулінгу підвищує стійкість до геометричних перетворень [6]. Використання пакетної нормалізації та додаткових методів регуляризації покращує збіжність і генералізацію моделі [7], а застосування трансформаційно-інваріантних шарів підвищує її стійкість до різних варіацій вхідних даних [8]. Водночас згорткові шари обмежені у захопленні глобального контексту, що компенсується рекурентними шарами LSTM, здатними зберігати інформацію протягом тривалих інтервалів та долати проблему зникання градієнтів [9, 10]. Для навчання на послідовностях змінної довжини, без явного вирівнювання між вхідними та вихідними даними, використовується функція втрат CTC, яка враховує всі можливі вирівнювання та покращує ефективність розпізнавання рукописних символів [11].

Альтернативним методом вирішення задачі розпізнавання рукописного тексту є навчання нейромережі з архітектурою трансформеру. Ця архітектура стала революційною у галузі обробки природної мови та комп'ютерного зору завдяки здатності обробляти великі послідовності у постійній кількості операцій, одночасно забезпечуючи ефективний паралелізм. Центральним елементом трансформеру є механізм уваги, особливо багатоголовна увага, що дозволяє моделі одночасно фокусуватися на різних частинах вхідної інформації [12, 13]. Механізм багатоголовної уваги паралельно застосовує кілька незалежних голів уваги, кожна з яких виконує власні перетворення вхідних даних через лінійні проєкції запитів, ключів та значень. Це забезпечує вивчення різних аспектів залежностей у даних, що підвищує здатність моделі розпізнавати неоднорідний контекст рукописних символів. Архітектура трансформеру також використовує позиційні кодування, аби зберегти інформацію про порядок елементів послідовності, оскільки сама модель не має вбудованого механізму для цього [14]. Додатково застосовуються шари нормалізації, залишкові зв'язки та feed-forward шари, які покращують стабільність тренування та виразну здатність моделі.

Виклад основного матеріалу. Використання трансформерної архітектури у різних задачах комп'ютерного зору, зокрема і в розпізнаванні рукописних символів, показало високі результати. Однак майже усі останні дослідження, які направлені на покращення ефективності роботи мереж на основі трансформерів, були зосереджені на поліпшенні механізму уваги [15, 16]. У той час, як майже не була розглянута заміна для іншого компонента мережі – багат шарового перцептронну. Лише зовсім нещодавні дослідження використовують інноваційну архітектуру – мережу Колмогоров-Арнольда на заміну MLP [17].

По суті, KAN представляє нову теорію навчання для тренування нейронних мереж, засновану на теоремі Колмогорова-Арнольда про представлення неперервної функції з кількома параметрами на обмеженому інтервалі – формула 1.

$$f(x) = f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q \left(\sum_{p=1}^n \phi_{p,q}(x_p) \right), \quad (1)$$

де кожна функція $\phi_{p,q}$ – є дійснозначною функцією, визначеною на інтервалі від 0 до 1 включно, а Φ_q є неперервною дійсною функцією, що приймає будь які дійсні значення.

Основна зміна процесу навчання полягає в навчанні функцій активації замість ваг у звичайному MLP. Також у KAN кожен ваговий параметр замінюється одновимірною функцією, зазвичай параметризованою як сплайн. Як наслідок, KAN взагалі не мають лінійних ваг. Вузли в KAN просто підсумовують вхідні сигнали без застосування будь-яких нелінійностей. На рисунку 1 [17] зображені основні відмінності моделі MLP від KAN.

На основі розширених експериментів із використанням синтетичних математичних і фізичних наборів даних KAN показав [17]:

- покращену точність навчених моделей порівняно з аналогами MLP;
- покращену інтерпретацію, завдяки демонстрації його здатності витягувати символічні зв'язки, на основі яких був синтезований набір даних;
- покращений розмір навчених параметрів, де моделям KAN потрібна менша кількість параметрів, щоб досягти того самого рівня точності, що й моделям MLP;

– вивчення нового завдання попередньо навченої моделі KAN на старому завданні менше впливає на ефективність старого завдання, ніж у випадку MLP, коли мережа може «забути» старе завдання.

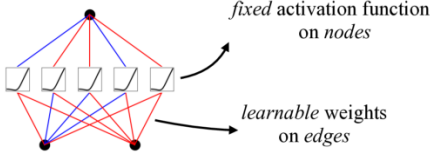
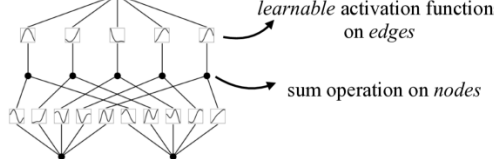
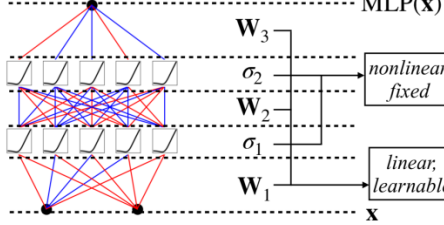
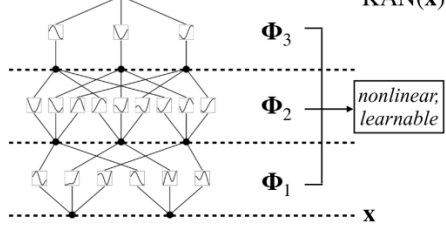
Model	Multi-Layer Perceptron (MLP)	Kolmogorov-Arnold Network (KAN)
Theorem	Universal Approximation Theorem	Kolmogorov-Arnold Representation Theorem
Formula (Shallow)	$f(\mathbf{x}) \approx \sum_{i=1}^{N(e)} a_i \sigma(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x} + b_i)$	$f(\mathbf{x}) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q \left(\sum_{p=1}^n \phi_{q,p}(x_p) \right)$
Model (Shallow)	(a) 	(b) 
Formula (Deep)	$\text{MLP}(\mathbf{x}) = (\mathbf{W}_3 \circ \sigma_2 \circ \mathbf{W}_2 \circ \sigma_1 \circ \mathbf{W}_1)(\mathbf{x})$	$\text{KAN}(\mathbf{x}) = (\Phi_3 \circ \Phi_2 \circ \Phi_1)(\mathbf{x})$
Model (Deep)	(c) 	(d) 

Рис. 1 – Порівняння моделей MLP та KAN [17]

Основними недоліками KAN є:

1) Базова функція. Стандартні функції B-spline у KAN не ідеальні для архітектур паралельних обчислень, типових для сучасних GPU. B-сплайни вимагають рекурсивних обчислень, що значно сповільнює навіть найбільш оптимізовані реалізації.

2) Неефективність параметрів і обчислень. Через те, що для кожної унікальної пари вводу-виводу в KAN потрібен окремий набір параметрів і базових функцій. Ця необхідність викликає експоненціальне зростання кількості параметрів у міру збільшення прихованого розміру мережі, що призводить до значних обчислювальних витрат і проблем з масштабованістю.

3) Ініціалізація ваги в KAN подібна до ініціалізації в MLP, але вона не відповідає потребам KAN щодо конвергенції. Ця невідповідність може призвести до нестабільності та погіршення продуктивності під час тренувального процесу.

У статті, що описує KAT [18], пропонується вирішення зазначених проблем реалізації KAN. А саме, запропоновано:

- 1) використовувати раціональні функції активації;
- 2) використовувати «груповий KAN», тобто розподіляти функціональні коефіцієнти та базові функції між групами ребер;
- 3) використовувати ініціалізацію із збереженням дисперсії.

Зазначені методи – покращують обчислювальну ефективність і стабільність навчання. Раціональні функції активації забезпечують сумісність з сучасними GPU, що прискорює тренування моделі. Груповий KAN зменшує обчислювальне навантаження без втрати продуктивності, що є критичним при обробці великих обсягів рукописних даних. Ініціалізація із збереженням дисперсії покращує стабільність моделі під час навчання, що може призвести до більш точних результатів. І хоча трансформери на основі мереж Колмогорова-Арнольда ще не використовувалися для розпізнавання рукописних символів, їх інтеграція в цю область може відкрити нові можливості. Трансформер Колмогорова-Арнольда успішно поєднує KAN із трансформерами і показує кращі результати у задачах розпізнавання зображень, виявлення об'єктів і семантичної

сегментації у порівнянні з класичними трансформерами [18]. Потенційне застосування КАТ у розпізнаванні рукописних символів може покращити продуктивність моделей, надаючи їм більш виразні можливості порівняно з традиційними MLP у трансформерах.

Архітектура створеної у роботі моделі являє собою двокомпонентний трансформер, що включає у себе візуальний КАТ у якості кодера та мовний КАТ у якості декодера. Архітектура кодера зображена на рис. 2, та декодера – на рис. 3.

Згідно з рис. 2, основними елементами моделі візуального КАТ, є: шар вбудовування вхідного зображення та L блоків, які, у свою чергу, складаються з: багатоголової уваги, шарової нормалізації та мережі прямого поширення на основі групових раціональних функцій. Отримані дані з кодера являють собою послідовність ознак $T1$, яка передається у декодер (рис. 3).

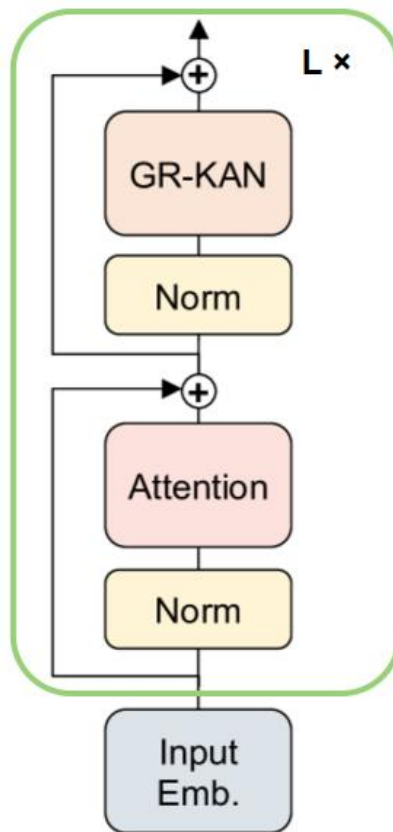


Рис. 2 – Архітектура візуального КАТ як моделі для вилучення ознак

Згідно з рис. 3, основними елементами моделі мовного КАТ є ті самі елементи, що використовуються у візуальному КАТ, але додатково використовується перехресна багатоголова увага між даними ($T1$), отриманими з декодера, та даними, отриманими з попереднього шару, – багатоголової самоуваги.

Перевагою використання дво-трансформерної архітектури створеної системи є спільні елементи в кодері та декодері. У обох трансформерах (рис. 2, та рис. 3) отриманні данні з багатошарової уваги ($x_0^{(l)}$) передаються у мережу прямого поширення на основі KAN. Мережа прямого поширення, у свою чергу, складається з декількох шарів групової раціональної мережі Колмогорова-Арнольда. KAN на основі раціональної функції з груповим обчисленням параметрів визначається за формулою 2.

$$\text{GR-KAN}(x) = W_{\text{GR-KAN}} F(x) = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \dots & w_{1,d_{\text{in}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{d_{\text{out}},1} & \dots & w_{d_{\text{out}},d_{\text{in}}} \end{bmatrix} \times \left[F_{[1/d_g]}(x_1) \dots F_{[d_{\text{in}}/d_g]}(x_{d_{\text{in}}}) \right]^T, \quad (2)$$

де:

- W_{GR-KAN} є вагами, що навчаються та визначається за формулою 3;
- $F(x)$ це раціональна функція, що визначається за формулою 4 [19].

$$W_{GR-KAN} \in \mathbb{R}^{d_{in} \times d_{out}}, \quad (3)$$

$$\phi(x) = wF(x) = w \frac{P(x)}{Q(x)} = w \frac{\sum_{j=0}^m a_j x^j}{1 + |\sum_{i=1}^n b_i x^i|}, \quad (4)$$

де:

- w – коефіцієнт масштабування;
- a_j, b_i, w – це параметри, що навчаються;
- m, n – параметри функції, у роботі прийняті значення $m = 5, n = 4$.

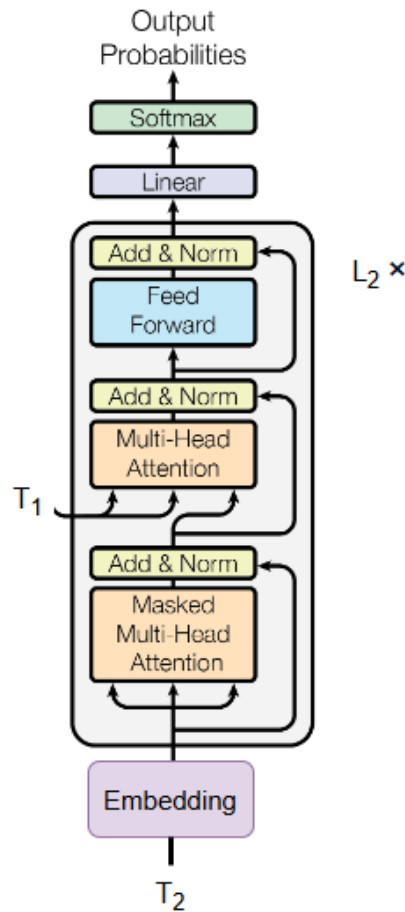


Рис. 3 – Архітектура мовного КАТ у якості декодера загальної моделі

У початковій моделі ViT мережа прямого поширення складається з двох лінійних шарів з двома функціями активації. Тому, у формулі обчислення виходу мережі прямого поширення на основі KAN (формула 5), використовуються 2 однакові шари GR-KAN. Після чого отримані данні передаються на початок наступного блоку, що знову обчислює данні за формулою 2 та 5 доти, доки данні не пройдуть через кожен блок.

$$x_l = GR - KAN \left(GR - KAN \left(LayerNorm \left(x_0^{(l)} \right) \right) \right) + x_0^{(l)}, [KAT]. \quad (5)$$

Для навчання створеної моделі використовувалися три датасети з трьох різних письмовностей: китайської, англійської, деванагарі. Кожен датасет містить зображення рядків тексту та

відповідну текстову транскрипцію зображених символів.

Модель KAN-Transformer спершу навчалась на китайському датасеті CASIA-HWDB [20], де за 34 епохи втрати знизилися з 3,5 до 0,6, графік втрат зображено на рис. 4.

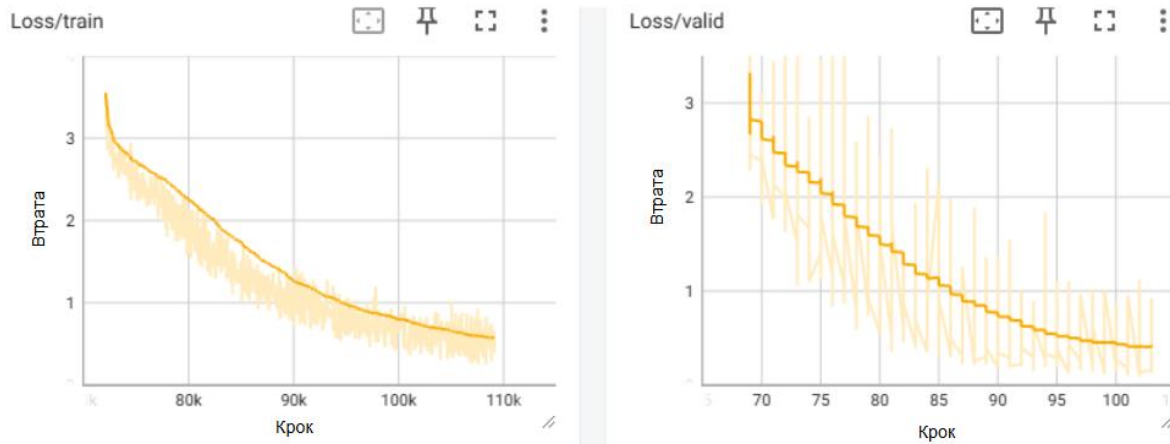


Рис. 4 – Графік втрат на навчальному (графік зліва) і перевірчному (справа) наборі китайських символів, з першого етапу навчання

Далі, з метою перевірки стійкості моделі до забування, її продовжили тренувати на деванагарі датасеті Devanagari Handwritten Dataset [21] до досягнення схожого рівня втрат (0,6), а потім на обох наборах одночасно. Результати показали, що модель не забуває попередні дані, оскільки середні втрати для обох датасетів залишилися на рівні 0,6. Навчання на двох наборах даних одночасно тривало до досягнення точності приблизно 0,25. Перевірка на валідаційних даних засвідчила подальшу можливість покращення моделі, не зважаючи на те, що темп зниження втрат сповільнився з часом. Графік втрат на цьому етапі навчання наведено на рис. 5.

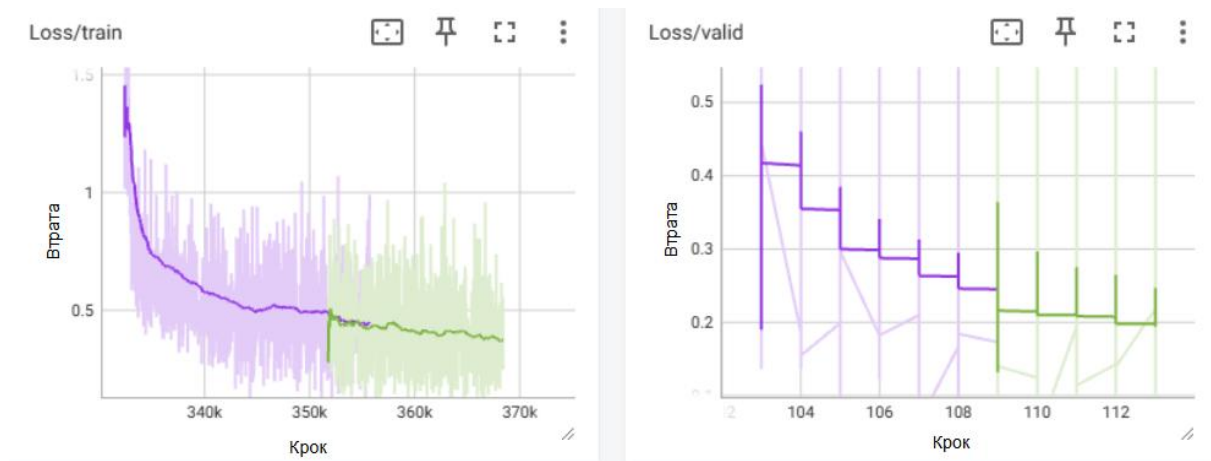


Рис. 5 – Графік втрат на навчальному (графік зліва) і перевірчному (справа) наборах символів деванагарі окремо (фіолетовим) й деванагарі з китайськими разом (зеленим), з другого етапу навчання

Наступним етапом було навчання моделі на англійському датасеті IAM HANDWRITING DATABASE [22]. У перших частинах навчання, графік втрат якої зображено на рис. 6, втрати знижувались, але згодом різниця стала незначною (графік втрат зображено на рис. 7), а на перевірчному наборі процес покращення зупинився, що свідчило про перенавчання. Для покращення було додано тестові приклади до тренувального набору, проте після досягнення мінімальних втрат (0,52) подальшого поліпшення не відбулось.

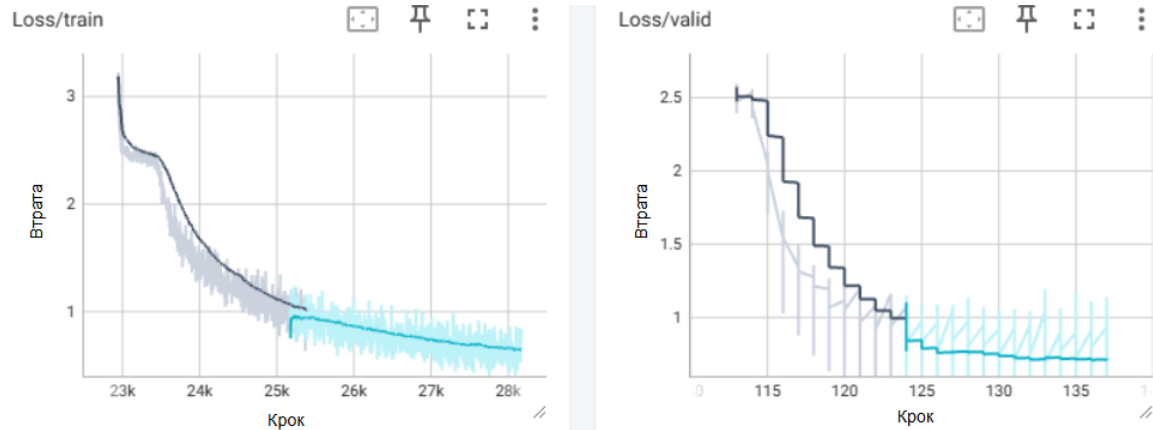


Рис. 6 – Перша частина графіків втрат на навчальному (графік зліва) і перевірчому (справа) наборі символів англійської писемності

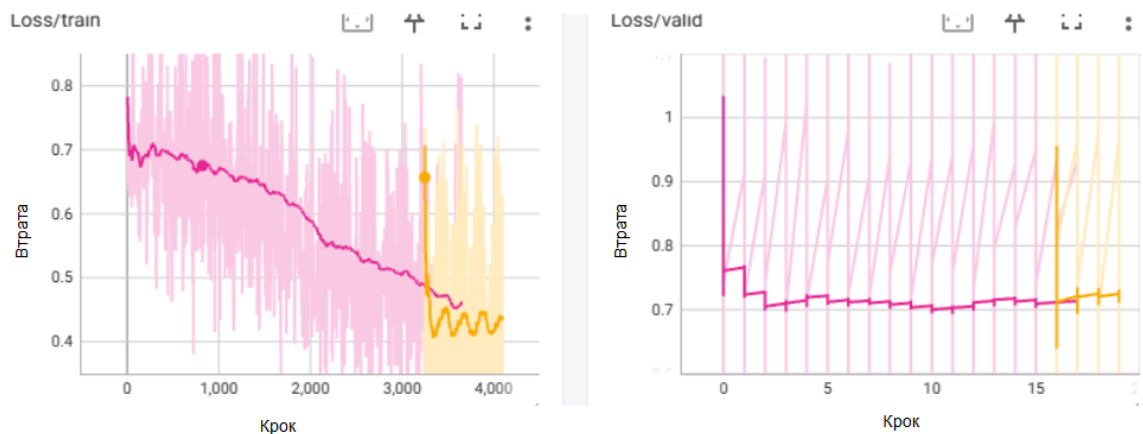


Рис. 7 – Друга частина графіків втрат на навчальному (графік зліва) і перевірчому (справа) наборі символів англійської писемності

Графік втрат останнього етапу навчання, після додавання нових даних у набір IAM, зображено на рис. 8.

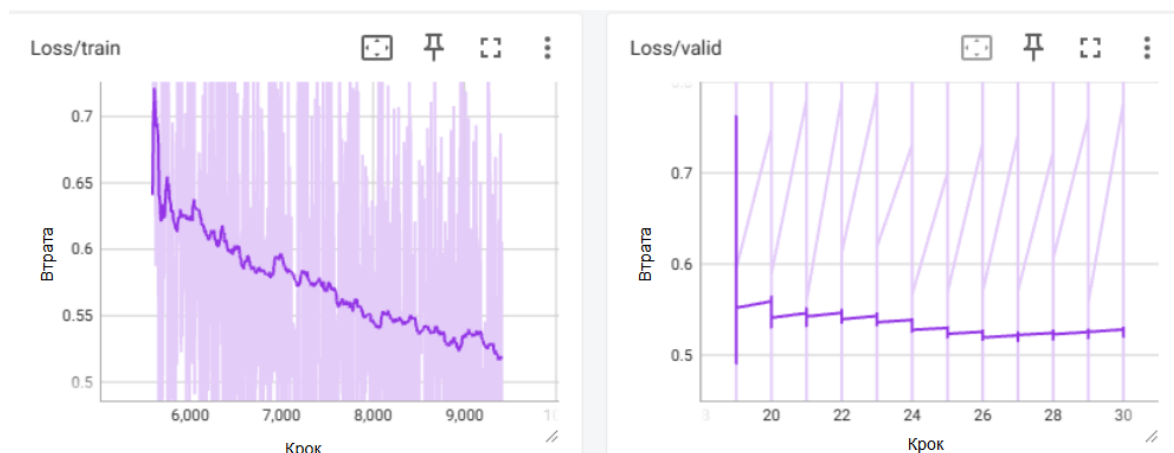


Рис. 8 – Графік втрат на навчальному (графік зліва) і перевірчому (справа) наборі символів англійської писемності, після додавання нових даних у навчальний набір

Слід зазначити, що для набору символів англійської писемності, кількість унікальних зображень рядків тексту є найменшою серед використаних наборів і дорівнює близько 10 тисяч, у той час як для інших використаних датасетів ця кількість становить приблизно 60 тис. унікальних зображень.

Створена модель була оцінена за ключовими метриками: CER (Character Error Rate), WER (Word Error Rate) та F1-score на рівні слів. Результати оцінювання моделі наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння оцінки створеної моделі за різними метриками для символів різних мов

Метрика	Оцінка точності для символів		
	китайська	деванагарі	англійська
CER	0,14	0,093	0,22
WER	0,14	0,3	0,49
F1	0,93	0,7	0,63

Модель найкраще розпізнавала китайський текст, порівняння оцінки f1 наведено у табл. 2 [23].

Таблиця 2

Порівняння різних моделей на рукописному тексті з набору китайських символів

Модель	F1 оцінка у відсотках
CRNN	48,0
ASTER	45,9
MORAN	30,2
SAR	31,0
SEED	21,1
MASTER	18,5
ABINET	13,8
TrOCR	51,7
Mask _{BASE}	63,7
DTrOCR	81,4
KAN-Transformer (модель, що була створена у результаті роботи)	93,0

Порівняння з іншими архітектурами (таблиця 2), показало, що створена модель KAN-Transformer демонструє найвищі результати для китайської мови (F1 = 93,0%). Також з таблиці 2 видно, що більшість моделей має точність розпізнавання близьку до 51 відсотка. Найкращим результатом, у попередніх дослідженнях, було досягнуто 81,4% на моделі DTrOCR.

Для датасету символів англійської писемності отримані результати розпізнавання гірші за точність розпізнавання існуючих моделей, у яких CER вимірюється від 0,1 до 0,028 [23].

У випадку датасету деванагарі писемності результати розпізнавання створеної моделі є достатньо ефективними. Однак порівняння точності між існуючими архітектурами неможливо провести через відсутність достатньої кількості навчених моделей HWR на деванагарі символах.

Висновки

На основі проведеного дослідження алгоритмів розпізнавання рукописних символів різних мов за допомогою моделі нейронних мереж KAN сформульовано основні висновки. Було детально проаналізовано сучасні методи оптичного розпізнавання символів на основі навчання нейронних мереж, встановлено, що навіть найсучасніші архітектури досягають певної межі точності розпізнавання, що обмежує їх подальшу ефективність. З'ясовано, що більшість існуючих архітектур базуються на багатошаровому перцептроні, що може призводити до обмежень у точності через конструктивні особливості. Для подолання цих обмежень запропоновано використовувати мережу Колмогорова-Арнольда як альтернативу MLP. Реалізована модель нейронної мережі з

архітектурою візуального КАТ та мовного КАТ продемонструвала зростання точності розпізнавання символів китайської письменності на 11% порівняно з найкращою існуючою моделлю, високі показники CER та F1 (CER = 0,093, F1 = 0,93), а також показала, що для навчання моделі необхідно велике число унікальних зображень з різним рукописним текстом. Існує кілька напрямків майбутніх досліджень, що включають дослідження застосування KAN в інших задачах комп'ютерного зору, дослідження оптимізації параметрів моделі для наборів даних, що не були представлені у роботі, а також дослідження використання хмарних обчислень у контексті підвищення швидкості роботи створеної моделі.

Перелік використаних джерел:

1. Plamondon R., Srihari S. N. Online and off-line handwriting recognition: a comprehensive survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. Vol. 22. Iss. 1. Pp. 63-84. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.824821>.
2. Handwritten Recognition Techniques: A Comprehensive Review / H.A. Alhamad et al. *Symmetry*. 2024. Vol. 16. Article 681. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16060681>.
3. A Deep Learning Approach for Robust, Multi-oriented, and Curved Text Detection / R. Ranjbarzadeh et al. *Cognitive Computation*. 2024. Vol. 16. Pp. 1979-1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12559-022-10072-w>.
4. Convolutional-Neural-Network-Based Handwritten Character Recognition: An Approach with Massive Multisource Data / Saqib N., Haque K.F., Yanambaka V.P., Abdelgawad A. *Algorithms*. 2022. Vol. 15. Article 129. DOI: <https://doi.org/10.3390/a15040129>.
5. Alzubi J., Anand N., Akshi K. Machine learning from theory to algorithms: an overview. *Journal of physics: conference series*. 2018. Vol. 1142. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1142/1/012012>.
6. Zeiler M.D., Fergus R. Visualizing and understanding convolutional networks. *Computer Vision – ECCV 2014: Proceedings of the 13th European Conference, Zurich, Switzerland, 6-12 September 2014*. Pp. 818-833. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10590-1_53.
7. Schilling F. The effect of batch normalization on deep convolutional neural networks : thesis of Master of Science – Computer Science. Stockholm, 2016. 102 p.
8. Laptev D., Buhmann J. M. Transformation-invariant convolutional jungles. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Boston, MA, USA, 07-12 June 2015. 2015. Pp. 3043-3051. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298923>.
9. Beyond exploding and vanishing gradients: analysing RNN training using attractors and smoothness / Ribeiro A. H., Tiels K., Aguirre L. A., Schön T. *Proceedings of the Twenty Third International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, Palermo, Italy, 26-28 August 2020. Vol. 108. Pp. 2370-2380. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08482>.
10. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9(8). Pp. 1735-1780. DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
11. End-to-end sequence labeling via convolutional recurrent neural network with a connectionist temporal classification layer / X. Huang et al. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2020. Vol. 13. Iss. 1. Pp. 341-351. DOI: <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.200316.001>.
12. HTR-VT: Handwritten text recognition with vision transformer / Li Y., Chen D., Tang T., Shen X. *Pattern Recognition*. 2024. Vol. 158. Article 110967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2024.110967>.
13. A light transformer-based architecture for handwritten text recognition / Barrere K., Soullard Y., Lemaitre A., Coüasnon B. *International Workshop on Document Analysis Systems*. 2022. Pp. 275-290. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06555-2_19.
14. Attention is all you need / A. Vaswani et al. *NIPS 2017 : 31st Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, CA, USA, 5-10 December 2017. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
15. Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows / L. Ze et al. *Proceedings of the IEEE/CVF International conference on computer vision*, Las Vegas, Nevada, USA, 10-17 Oct. 2021. Pp. 9992-10002. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00986>.

16. Mlp-mixer: An all-mlp architecture for vision / I.O. Tolstikhin et al. *NIPS'21 : Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 6-14 December 2021. Pp. 24261-24272. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.01601>.
17. Kan: Kolmogorov-Arnold networks / L. Ziming et al. 2024. Pp. 1-50. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>.
18. Yang X., Wang X. Kolmogorov-Arnold Transformer. 2024. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.10594>.
19. Molina A., Schramowski P., Kersting K. Padé Activation Units: End-to-end Learning of Flexible Activation Functions in Deep Networks. *International Conference on Learning Representations*, 26 April - 26 May 2020. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.06732>.
20. Online and offline handwritten Chinese character recognition: benchmarking on new databases / Liu C.-L., Yin F., Wang D.-H., Wang Q.-F. *Pattern Recognition*. 2013. Vol. 46. Iss. 1. Pp. 155-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.06.021>.
21. Offline Handwriting Recognition on Devanagari using a new Benchmark Dataset / Dutta K., Krishnan P., Mathew M., Jawahar C. V. *13th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems (DAS)*, Vancouver, Canada, 24-27 April 2018. Pp. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAS.2018.69>.
22. Marti U.-V., Bunke H. The IAM-database: an English sentence database for offline handwriting recognition. *International journal on document analysis and recognition*. 2002. Vol. 5. Pp. 39-46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s100320200071>.
23. Fujitake M. Dtrocr: Decoder-only transformer for optical character recognition. *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, Waikoloa, HI, USA, 03-08 January 2024. Pp. 8010-8020. DOI: <https://doi.org/10.1109/WACV57701.2024.00784>.

References:

1. R. Plamondon, and S.N. Srihari, «Online and off-line handwriting recognition: a comprehensive survey», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, iss. 1, pp. 63-84, 2000. doi: **10.1109/34.824821**.
2. H.A. Alhamad et al., «Handwritten Recognition Techniques: A Comprehensive Review», *Symmetry*, vol. 16, article 681, 2024. doi: **10.3390/sym16060681**.
3. R. Ranjbarzadeh et al., «A Deep Learning Approach for Robust, Multi-oriented, and Curved Text Detection», *Cognitive Computation*, vol. 16, pp. 1979-1991, 2024. doi: **10.1007/s12559-022-10072-w**.
4. N. Saqib, K.F. Haque, V.P. Yanambaka, and A. Abdelgawad, «Convolutional-Neural-Network-Based Handwritten Character Recognition: An Approach with Massive Multisource Data», *Algorithms*, vol. 15, article 129, 2022. doi: **10.3390/a15040129**.
5. J. Alzubi, N. Anand, and K. Akshi, «Machine learning from theory to algorithms: an overview», *Journal of physics: conference series*, vol. 1142, pp. 1-15, 2018. doi: **10.1088/1742-6596/1142/1/012012**.
6. M.D. Zeiler, and R. Fergus, «Visualizing and understanding convolutional networks», in Proc. 13th European Conf. «Computer Vision – ECCV 2014», Zurich, Switzerland, 2014, pp. 818-833. doi: **10.1007/978-3-319-10590-1_53**.
7. F. Schilling, «The effect of batch normalization on deep convolutional neural networks», M.S. thesis, Stockholm, Sweden, 2016.
8. D. Laptev, and J.M. Buhmann, «Transformation-invariant convolutional jungles», in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, MA, USA, 2015, pp. 3043-3051. doi: **10.1109/CVPR.2015.7298923**.
9. A.H. Ribeiro, K. Tiels, L.A. Aguirre, and T. Schön, «Beyond exploding and vanishing gradients: analysing RNN training using attractors and smoothness», in Proc. 23d Int. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics, Palermo, Italy, 2020, vol. 108, pp. 2370-2380. doi: **10.48550/arXiv.1906.08482**.
10. S. Hochreiter, and J. Schmidhuber, «Long Short-Term Memory», *Neural Computation*, vol. 9(8), pp. 1735-1780, 1997. doi: **10.1162/neco.1997.9.8.1735**.
11. X. Huang, L. Qiao, W. Yu, J. Li, and Y. Ma, «End-to-end sequence labeling via convolutional recurrent neural network with a connectionist temporal classification layer», *International Journal of*

- Computational Intelligence Systems*, vol. 13, iss. 1, pp. 341-351, 2020. doi: **10.2991/ijcis.d.200316.001**.
12. Y. Li, D. Chen, T. Tang, and X. Shen, «HTR-VT: Handwritten text recognition with vision transformer», *Pattern Recognition*, vol. 158, article 110967, 2024. doi: **10.1016/j.patcog.2024.110967**.
 13. K. Barrere, Y. Soullard, A. Lemaitre, and B. Coüasnon, «A light transformer-based architecture for handwritten text recognition», *International Workshop on Document Analysis Systems*, pp. 275-290, 2022. doi: **10.1007/978-3-031-06555-2_19**.
 14. A. Vaswani et al., «Attention is all you need», in Proc. 31st Conf. on Neural Information Processing Systems NIPS 2017, Long Beach, CA, USA, 2017, pp. 1-11. doi: **10.48550/arXiv.1706.03762**.
 15. L. Ze et al., «Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows», in Proc. IEEE/CVF International conference on computer vision, Las Vegas, Nevada, USA, 2021, pp. 9992-10002. doi: **10.1109/ICCV48922.2021.00986**.
 16. I.O. Tolstikhin et al., «Mlp-mixer: An all-mlp architecture for vision», in Proc. 35th Int. Conf. on Neural Information Processing Systems NIPS'21, 2021, pp. 24261-24272. doi: **10.48550/arXiv.2105.01601**.
 17. L. Ziming et al., «Kan: Kolmogorov-Arnold networks», 2024, pp. 1-50. doi: **10.48550/arXiv.2404.19756**.
 18. X. Yang, and X. Wang, «Kolmogorov-Arnold Transformer», 2024, pp. 1-19. doi: **10.48550/arXiv.2409.10594**.
 19. A. Molina, P. Schramowski, and K. Kersting, «Padé Activation Units: End-to-end Learning of Flexible Activation Functions in Deep Networks», in Proc. Int. Conf. on Learning Representations, 2020, pp. 1-17. doi: **10.48550/arXiv.1907.06732**.
 20. C.-L. Liu, F. Yin, D.-H. Wang, and Q.-F. Wang, «Online and offline handwritten Chinese character recognition: benchmarking on new databases», *Pattern Recognition*, vol. 46, iss. 1, pp. 155-162, 2013. doi: **10.1016/j.patcog.2012.06.021**.
 21. K. Dutta, P. Krishnan, M. Mathew, and C.V. Jawahar, «Offline Handwriting Recognition on Devanagari using a new Benchmark Dataset», in Proc. 13th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems (DAS), Vancouver, Canada, 2018, pp. 25-30. doi: **10.1109/DAS.2018.69**.
 22. U-V. Marti, and H. Bunke, «The IAM-database: an English sentence database for offline handwriting recognition», *International journal on document analysis and recognition*, vol. 5, pp. 39-46, 2002. doi: **10.1007/s100320200071**.
 23. M. Fujitake, «Dtrocr: Decoder-only transformer for optical character recognition», in Proc. IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, Waikoloa, HI, USA, 2024, pp. 8010-8020. doi: **10.1109/WACV57701.2024.00784**.

Стаття надійшла 13.08.2024

Стаття прийнята 10.09.2024

УДК 004.8

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321205

© Волошин В.С.*

РОЛЬ НОВОГО ПОКОЛІННЯ СИСТЕМ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ У РОЗВИТКУ ЛЮДИНИ (НА ПРИКЛАДІ МЕРЕЖІ CHATGPT)

В роботі розглядається «pro-contra» у відносинах між людиною та машиною, маючи на увазі під останню системи штучного інтелекту (AI). Вперше увага приділяється такому аспекту питання, як суб'єктність і об'єктність частин системи «людина-машина». Такі критерії системи, як відношення до термодинамічної нерівноважності, вектори змінення ентропії, що відносяться як до людини, так і до систем

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8423-2663, yvslshn52@gmail.com

AI, показують, що за існуючих умов та темпів розвитку AI, на прикладі GPT5 та GPT5, все більше переваг можна віднести до систем з AI. Людина поступово, і вже не вперше, втрачає пріоритети в конкуренції з «машиною». Така, здавалося б, непо-рушна людська якість, як когнітивність, все більше знаходить своє відображення в нових системах AI і, зокрема, в GPT. Такі його складові, як візуальність, чуттєвість і людський слух, поступово відображаються в «оцифрованих» функціях штучного інтелекту. Однією з нагальних причин таких змін є зміна ролі людини в системі «люди-на-машина-середовище» від її традиційної суб'єктивності до об'єктивності, пос-тупова втрата можливостей впливу на системи AI. Показано, що головною метою є здатність до саморозвитку AI, освоєння нових знань за допомогою відомих на цьому етапі знань, що досягається простим збільшенням суперпам'яті та високою швидкістю її обробки за допомогою спеціалізованої регенеративної нейронної ме-режі «Трансформер». Це сприяє формуванню спеціалізованої логіки миттєвого пе-рерахування варіантів, яка виявляється кращою за когнітивну вибірково логіку лю-дини і може означати, наприклад, перехід активності, а то й суб'єктивності, від людини до AI. Такий перехід може відбутися лише в одному передбачуваному випа-дку: коли ШІ знаходить внутрішні можливості конкурувати з людиною за її когні-тивними якостями.

Ключові слова: штучний інтелект, ChatGPT, вектор зміни ентропії, суб'єктність ChatGPT, об'єктність користувача.

V.S. Voloshyn. The role of a new generation of systems with artificial intelligence in human development (on the example of the ChatGPT network). The paper examines the «pro-contra» in the relationship between human and machine, implying artificial intelligence (AI) systems by the latter. For the first time, attention is paid to such an aspect of the issue as the subjectivity and objectivity of parts of the human-machine system. development of AI on the example of GPT4 and especially GPT5, more and more preferences can be attributed to AI systems, and a person gradually, and not for the first time, loses priorities in competition with the «machine». Such a seemingly unshakable human quality as cogni-tion is increasingly reflected in new AI systems and, in particular, in GPT. Its components such as visuality, sensuality, and human hearing are gradually reflected in the «digitized» AI functions. One of the urgent reasons for such changes is the change in the role of a person in the system «man-machine-environment» from his traditional subjectivity to ob-jectivity, and the gradual loss of opportunities to influence AI systems. It is shown that the main goal is the ability to self-develop AI, the development of new knowledge with the help of known at this stage, is achieved by a simple increase in super memory and high speed of its processing using a specialized regenerative neural network «Transformer». These are contributing to the formation of a specialized logic of instantaneous enumeration of op-tions, which turns out to be preferable to the cognitive selective logic of a person and can mean, for example, a transition of activity, and even subjectivity, from a person towards AI. Such a transition can take place only in one predictable case: when AI finds internal opportunities for comparison with a person in terms of his cognitive qualities.

Keywords: artificial intelligence, ChatGPT, vector of entropy change, subjectivity ChatGPT, user objectivity.

Постановка задачі. Стрімкий розвиток сучасних систем штучного інтелекту (AI) вимагає більш адекватного погляду на його взаємини з людиною. Навіть відомі фахівці в галузі інформа-ційних технологій поступово змінюють свої погляди на проблему пріоритетності в таких лю-дино-машинних системах. Особливо, якщо мова йде про такі сучасні демократичні та потужні продукти, як модель ChatGPT останніх поколінь. Поки що немає авторитетних або загальнови-знаних критеріїв, які б дозволили порівнювати ці дві частини системи, проте є багато показників, які відображають у світлі такого завдання рівень конкуренції між людьми та штучним інтелектом. Їх можливості можуть зіграти роль стимулятора нових досліджень в області сучасних інформа-ційних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Скептичні судження відомих вчених про роль штучного інтелекту у всьому розвитку теми або підтверджуються [1-4], або спростовуються цілком переконливими фактами [5, 6], яких останнім часом стає все більше.

Нас цікавлять питання критеріїв оцінки впливу *AI* на ті системи, у яких протягом тисячоліть домінувала людина. Ця дискусія має єдину мету: визначити місце і роль людини в конкуренції зі створеним нею штучним інтелектом [7]. Ревізії підлягають твердження навіть таких відомих фахівців, як Джарон Ланьє [2], Гарі Маркус [5], Ян ЛеКун [7] та інших щодо неможливості в доступному для огляду майбутньому ототожнення людського і машинного інтелекту, коли на чільне місце висуваються недосяжні для машини людські цінності.

Сучасний штучний інтелект представлений відомими системами, в основі яких, наприклад, лежить нова універсальна та масштабована архітектура генеративної нейронної мережі «Трансформер» з високою швидкістю обробки інформації. На її основі функціонує модель *ChatGPT* (*Generative Pre-trained Transformer*). Якщо обсяг пам'яті, який був закачаний творцями в *GPT* першого покоління, був 5-40 Гбайт і така навчена нейронна мережа виявилася здатною генерувати кожен наступний параметр на основі попередніх цілих речень з високою точністю відтворення, потім *GPT3* (обсяг доступної інформації становив 570 Гбайт) виявився здатним до самонавчання, самим незбагненим чином отримуючи знання в області, наприклад, математики і дозволяючи відповідати на більшість питань з цієї області, далекої від текстових редакторів знань [8, 9]. Наступна версія *GPT4* виявилася здатною формувати власну «картину світу», оперуючи знаннями в області фізики, хімії і навіть квантової механіки. У той же час процес «самонавчання» набирає обертів у геометричній прогресії, і *ChatGPT* п'ятого покоління буде здатним формалізувати органи людського зору та слуху за допомогою цифрових генеративних здібностей та надати нові сфери застосування у сфері мистецтво [10, 11].

В ході технічної революції не вперше людина поступово втрачає свої переваги в людино-машинних системах, поступаючись машинам. У ретроспективі [12, 13]:

- 1811 – луддити в Бірмінгемі та Ліверпулі розбивають ткацькі верстати, які забирають у них роботу. Машина перемагає і відвоює свою невеличку нішу у майбутньому;
- 1819 рік – заява Рікардо про те, що машини можуть замінити людину і це неминуче;
- 1920 – Р. Фріман відкриває дискусію на тему «Чи поглинуть машини людину»;
- 30-ті роки ХХ століття – поява терміну «технологічне безробіття» від Дж. Кейнс. Розвиток технологій дозволяє знизити потребу в людській праці;
- 70-ті роки ХХ століття світ отримав повністю автоматизовані заводи, що дозволило знизити залежність від людської праці на порядки. Економіст В. Леонтьєв стверджує, що «людина повторить долю тяглогового коня» – в ході технічної революції він виявився непотрібним;
- 2014 рік, М. Цукерберг із гаслом «Learn to code» – «Навчимо шахтаря програмувати» – оголосив пріоритети машин-комп'ютерів перед людиною.

Тим більш, така динаміка може стати актуальною в ході 4-ї технологічної революції, свідками якої ми є сьогодні.

Мета статті – запропонувати опосередковані критерії оцінки, за якими можна порівняти системи штучного інтелекту та людину на сучасному рівні їх розвитку (на прикладі *ChatGPT*) та показати динаміку результатів, досягнутих сучасною системою *AI*.

Виклад основного матеріалу. У 2024 року штучний інтелект системи *ChatGPT* має загальом 200 млн користувачів, 1,5 млрд щомісячних відвідувань на всіх своїх платформах та обробку близько 156,4 млрд запитів на рік (табл. 1). Проста оцінка кількості інформації, яку користувачі запитують та отримують за опосередкованими даними (див. табл. 1), показує цифри $2,16 \cdot 10^{15}$ та $1,38 \cdot 10^{19}$ байт на рік, відповідно. Останній цифрі відповідає $1 \cdot 10^{20}$ біт інформації або, за принципом Ландауера, $9,6 \cdot 10^{-4}$ Дж енергії, необхідної для обробки цієї інформації (при кімнатній температурі 300 К).

Ми розглядаємо вектор зміни ентропії як результат досягнення максимально можливої термодинамічної нерівноважності і як індикатор розвитку або деградації екосистем, до яких ми, перш за все, відносимо системи «людина-машина-середовище». Тезу про термодинамічну нерівновагу як індикатор розвитку екосистем було запропоновано І. Пригожиным у кількох своїх роботах, наприклад, [14].

Таблиця 1

Оціночні характеристики системи *ChatGPT* четвертого покоління

№№	Параметр	Значення
1	Число користувачів ChatGPT за рік	200 млн
2	Кількість відвідувань на всіх платформах ChatGPT за рік	156,4 млрд
3	Споживання енергії для обробки інформації протягом року	365 ГВт·год
4	Енергоспоживання для одного запиту	2,33 Вт·год
5	Середня кількість запитів на одного користувача за місяць	300
6	Опосередкований обсяг даних на один запит, число слів чи знаків (L_i)	500-1000 слів (4-8) кБ

Будь-яка генерація в моделях типу *GPT* супроводжується зміною ентропії, причому чим вище різноманітність виходів в нейронної моделі, тим вище навантаження на процесори, тим вище опосередкована ентропія такої системи. Для таких систем ентропію слід шукати як в якісних відношеннях енергії, так і в середньому обсязі інформації, яку можна отримати з джерела з імовірнісним розподілом можливих виходів (слів або символів). Інформаційна ентропія в таких системах залежить від:

- архітектури моделі (загальна кількість параметрів моделі та її конфігурація) і можливості генерації різноманітних виходів, що, в кінцевому результаті, визначає напрямок зміни ентропії;
- обсяг навчального масиву (чим більше і різноманітніше вихідні дані, тим вище здатність генерувати нові і несподівані виходи і тим більше ентропія системи).

Залежність від температури носить опосередкований характер, тому що більшість користувачів знаходяться в зоні дії кімнатних температур. Тому слід враховувати, що енергетичні показники в масштабі таких систем *AI*, як *GPT4*, крім вищезазначеної кількості параметрів і обсягу даних, залежать ще й від складності вирішуваних завдань, які вимагають великих обчислювальних потужностей, втрат енергії на них, а, отже, пов'язані зі збільшенням ентропії.

Якщо прийняти до уваги процеси, описані в теоремі І. Пригожина, згідно з якими в будь-якій енергетичній системі, що прагне до синергізму, можливі процеси емісії ентропії в надсистему і протилежні процеси викиду в систему якісної енергії, то ми зіткнемося з деякими цікавими проявами термодинамічної нерівноважності для системи «людина-машина», якщо під «машиною» розуміти штучний інтелект і його технічне забезпечення. Запишемо цю теорему для нашої цілі так: $(\pm)\Delta S_e = \sum_\gamma [\sigma_\gamma(\Delta\tau) - J_\gamma \nabla\mu] \Delta\tau$, де: ΔS – вектор зміни ентропії за певний проміжок часу $\Delta\tau$; $\sigma_\gamma(\Delta\tau) = \sigma/\tau$ – внутрішня швидкість створення ентропії шляхом γ -збурення; J_γ – зовнішній потік енергії щодо γ -збурення; $\nabla\mu = (\frac{\delta\mu}{\delta x}, \frac{\delta\mu}{\delta y}, \frac{\delta\mu}{\delta z})$ – градієнт термодинамічного потенціалу. Сумарна зміна ентропії $\pm\delta S = (\pm)\Delta S + \Delta H(n_i)$ показує напрямок швидкості її зміни при наявності зовнішнього потоку енергії, а розрахункові дані для цього наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Оціночні дані для розрахунку зміни ентропії в системі штучного інтелекту *GPT4*

Загальний баланс енергії на навчання <i>GPT4</i>	$6,6 \cdot 10^6$ Дж	Оціночний базовий рівень зміни ентропії під час роботи користувача за один запит	26,57 біт $2,54 \cdot 10^{-22}$ Дж/К ($T = 300$ K)
Енергія на обробку запитів в <i>GPT4</i>	$72 \div 180$ Дж/запит	Повні енерговитрати <i>GPT4</i> обслуговування одного користувача за один запит	$3,6 \cdot (10^5 \div 10^6)$ Дж
Загальна енергія на виведення інформації в <i>GPT4</i>	$1,8 \cdot 10^8$ Дж/доб	Одночасна кількість користувачів у мережі <i>chatGPT4</i>	10^5
Загальний обсяг пам'яті в <i>GPT4</i>	$7,0 \cdot 10^{11}$ байт	Обсяг унікальних токенів n_i Об'єм токенів, що повторюються, n_j	$2,0 \cdot 10^{11}$ байт $5,0 \cdot 10^{11}$ байт

Продовження таблиці 2

Обсяг навчальних даних у <i>GPT4</i>	$5 \cdot 10^{14}$ байт	Обсяг унікальних токенів n_i Об'єм токенів, що повторюються, n_j	$4,0 \cdot 10^{14}$ байт $1,0 \cdot 10^{14}$ байт
Розрахункова середня оцінка зміни ентропії системи	2,66 біт/запит	Імовірнісні розподіли інформації $P(n_j)$	0,1 ÷ 0,95
Площа поверхні планети з доступом до Інтернету	$3,7 \cdot 10^{16}$ м ²		

Звернемося до розрахунку ентропії, що супроводжує роботу штучного інтелекту, на прикладі *ChatGPT4* (рис. 1). Інформація, що генерується в такому джерелі *AI*, не може не мати власної ентропії, принаймні за формулою Шеннона $\Delta H(n_i) = -\sum_{i=1}^I P(n_i) \log_2 P(n_i)$. Найпростіші оцінки показують, що чиста зміна ентропії в джерелі *GPT*, що приходить на одного користувача за один інформаційний запит, для генерації дуже мала $\Delta H(n_{1,1}) = 2,657$ біт, бо при температурі 300 К – це $2,54 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (див. табл. 1). Але для загального числа користувачів $2 \cdot 10^8$ при загальній кількості $1,56 \cdot 10^{11}$ запитів, кожен з яких може містити $L_i = (4 \div 8)$ кбайт інформації, сумарна зміна ентропії всієї інформаційної системи вже складає відчутні $3,96 \cdot 10^{-10}$ Дж/К, що робить її порівнянною з іншими типовими видами людської діяльності.

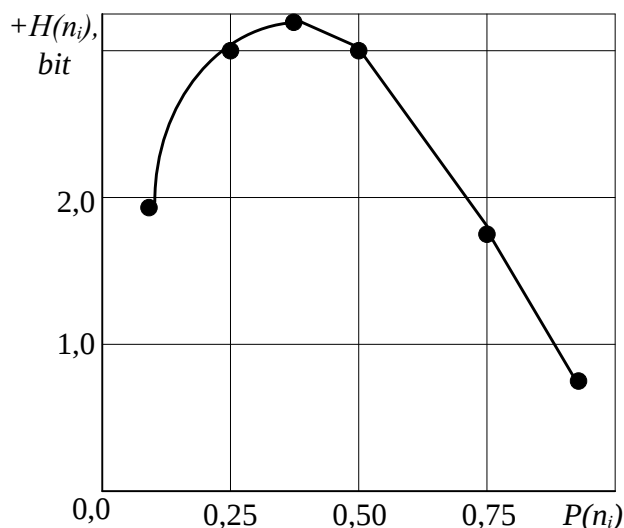


Рис. 1 – Розподіл ентропії, що відповідає одному запиту одного користувача в *ChatGPT4* у залежності від інформативності системи

Беручи до уваги претензії вектора зміни ентропії щодо оцінки термодинамічної нерівноважності як показника ефективності в системах *AI*, необхідно обґрунтувати його можливості (табл. 3). Вони полягають у наступному:

- мінімальну ентропію в системі *AI* можна досягти за рахунок монотонності завдань, вузьких тем, повторного використання відповідей та відсутності креативності;
- складність і унікальність завдань призводить до збільшення часу їх виконання і зростанню ентропії і залежить від оптимізації моделі і наявних ресурсів;
- зі збільшенням кількості завдань, що обробляються в *GPT*, модель може стати більш ефективною у відповідях, що призводить до зниження ентропії;
- зі збільшенням досвіду роботи з моделлю компетенції користувача зростають, але не досягають верхньої межі, і унікальність завдань не зникає повністю, завдяки різноманітності контексту і формулювань в *Prompt*;
- при тривалому використанні моделі все більша кількість завдань стають тривіальними і ентропія для такого користувача поступово мінімізується. Хоча унікальність в *Prompt* не зникає

повністю, навіть у типових завданнях. Рівень ентропії завжди підтримується непередбачуваністю запитів користувача і його креативністю, як одною з властивостей когнітивності людини;

- якщо креативність виконуваних завдань залишається незмінною, то твердження про мінімізацію ентропії в процесі використання моделі стає більш обґрунтованим.

Таблиця 3

Фактори, що впливають на зміну ентропії для користувача в процесі використання *ChatGPT4*

Позитивний вплив		Негативний вплив	
Показник	%	Показник	%
Складність завдання	30	Одноманітність запитів. Повторення	32
Унікальність запитів	23	Вузька тематика, обмеження однією темою	23
Контекст та формулювання завдань	17	Ступінь передбачуваності відповіді	13
Широка тематична спрямованість	10	Стандартні формулювання	12
Кількість виконаних завдань	6	Кількість виконаних завдань	9
Креативність користувача	6	Креативність користувача	7
Ступінь передбачуваності	3	Відсутність інтерактивності	4
Інтерактивність та зворотний зв'язок	2		
Параметри моделі GPT4	2		

На фактор мінімізації ентропії при роботі системи також впливають:

- тривіальність одержуваних завдань (в системі їх відсоток може досягати 70) і звуження теми запитів;

- якщо кількість завдань зростає, але їх креативність не зростає;

- зниження інтересу до системи, обмеження продуктивності, зростання передбачуваності відповідей у зв'язку з комерціалізацією *GPT*.

У міру зростання складності або унікальності нових символів в рядку генерації ми неминуче прийдемо до стану мінімально змінного ентропійного насичення (точка *A*, рис. 2), навіть незважаючи на зростання використаних обчислювальних потужностей. У той же час, відносно невеликі зміни ентропії будуть пов'язані з генерацією в *GPT4* інформації загального стандартного типу. Генеруюча мережа буде здатною протягом тривалого часу створювати стандартні і загальноприйняті результати (знаки, символи, слова). Через певний сукупний інтервал $N(B) - N(A)$ система може бути здатною вийти з цього рівня насичення (точка *B*, див. рис. 2). Але при цьому, згідно з самими розрахунковими розрахунками, ми будемо мати справу вже не зі збільшенням зміни ентропії, а з її зменшенням ($-\Delta S$).

1. Можна лише припустити, що однією з причин такої поведінки майбутньої системи штучного інтелекту будуть ті ж самі процеси, які послідовно проявлялися в *GPT4* і, можливо, в моделях *GPT5*, за рахунок різкого збільшення обсягу інформаційного контенту та відповідних синергетичних ефектів для вже не суто лінгвістичної моделі, яка самостійно генерує здатність створювати власну «картину світу», включаючи в область своїх знань інформацію про суміжні з мовами знання математики, інформатики, фізики тощо.

2. Другим фактором на користь такого синергетичного ефекту, який безсумнівно пов'язаний з термодинамічною нерівноважністю системи, є зміна пріоритетів для логічних зв'язків в системі «людина-машина». Вона може полягати в набутті системою штучного інтелекту права суб'єктності та збереженні за людиною права об'єктності з відповідними змінами причинно-наслідкових зв'язків. Тобто штучний інтелект потенційно міг би стати здатним позбутися людської залежності (прогнозовані залежності праворуч від точки *B*, див. рис. 2). Причиною цього може стати фактор наближення знову набутих якостей штучного інтелекту до того, що відносилось тільки для людини і було «табу» для машин. Це є когнітивність.

Когнітивні здібності людини завжди були безумовною перевагою між нею та штучним інтелектом, яку *AI* як «безнервова» система не в змозі подолати [2]. Людині потрібно було

придумати альтернативу своєму когнітивному сприйняттю світу для систем з *AI*, щоб зробити їх конкурентоспроможними до самих себе.

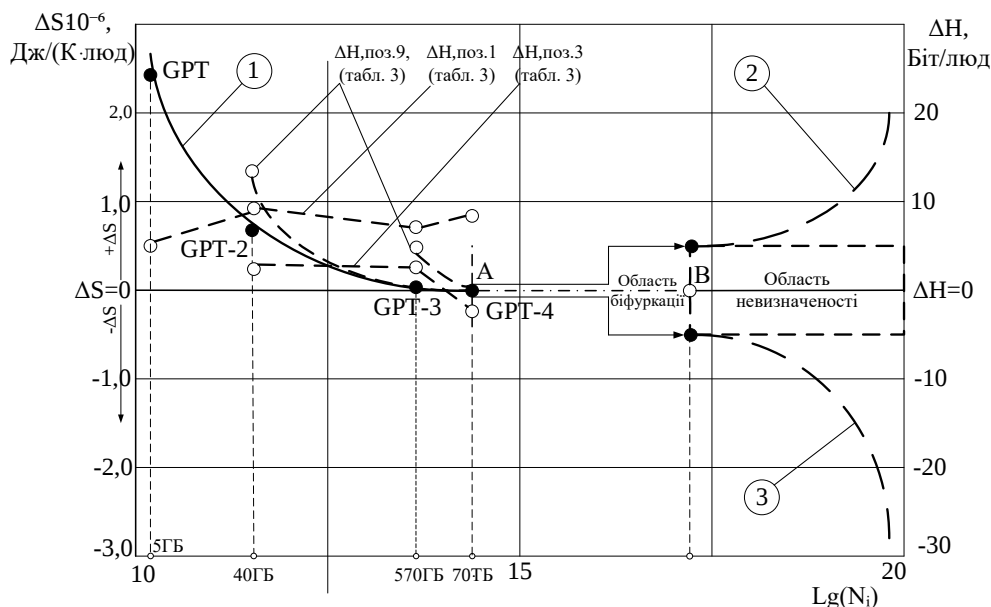


Рис. 2 – Відносна зміна ентропії під час функціонування різних версій *ChatGPT* з розрахунку одного користувача на рік: 1 – фактичні розрахункові дані; 2 – розрахункові дані для *AI* як об'єкта в системі «людина-машина»; 3 – розрахункові дані для *AI* як суб'єкта в системі «людина-машина»

Природа здатна демонструвати форми поведінки, які виконують завдання, схожі на когнітивні, але використовує інші механізми: від колективного інтелекту у комах до епігенетичної адаптації у рослин і нейронних мереж у восьминогів. Таким чином, формувати поведінку нейронних мереж у системах *AI* з функціями, схожими на когнітивізм у людей, можливо. І, безумовно, важливими є умови для виникнення штучного механізму «когнітивізму» для *AI*.

Сьогодні нейронні мережі, такі як *GPT4* і, судячи з усього, *GPT5*, здатні до прояву деяких якостей, які можна порівняти з когнітивними якостями самої людини (табл. 4). Поки що без урахування її емоційного контенту.

Таблиця 4

Порівняння когнітивних параметрів людини з відповідними технічними параметрами штучного інтелекту (заштриховані області дають уявлення про переваги тієї чи іншої системи)

	Людина та її когнітивність	Штучний інтелект
1	Інтуїтивний вибір варіантів	Механічний перебір варіантів
2	Сприйняття образів	Контекстне розпізнавання образів. «Картина світу», як основа сприйняття
3	Здатність до обробки інформації	Цифрова обробка інформації
4	Адаптація до вирішення завдань	Алгоритм, чітко структуровані дані
5	Увага. Здатність до зосередження та перемикання між завданнями	Безпомилковість обробки інформації. Attention Mechanisms. Паралельність.
6	Оперативне управління пам'яттю в $3 \cdot 10^{12}$ байт	Оперативне керування пам'яттю в $9 \cdot 10^{22}$ байт
7	Навчання на основі досвіду	Deep Learning, Reinforcement Learning,
8	Логічне мислення	Логічна обробка інформації.
9	Креативність	Генеративні моделі: GPT4, GANs та ін.
10	Емоційний контекст	-

Головна мета – здатність до саморозвитку *AI*, освоєння нових знань за допомогою відомих досягається простим збільшенням гіперпам'яті та високою швидкістю її обробки даних за допомогою спеціалізованої регенеративної нейронної мережі «Трансформер». Зокрема, це стосується:

- формування зовсім іншої, спеціалізованої логіки миттєвого пошуку варіантів, яка забезпечується *AI* і виявляється кращою перед когнітивною вибірковою логікою людини за рахунок досягнутих безпрецедентних обсягів пам'яті та величезної швидкості її обробки;

- здатність у *AI* до пізнання «картини світу» через ще досі незрозумілі процеси розуміння причинно-наслідкових зв'язків між різними генеративними об'єктами в сучасній оцифрованій «картині світу» дозволила нівелювати головну відмінність людини від «машини» – її когнітивне сприйняття цього світу. Це прямий шлях до пізнання непізнаного в умовах невизначеності;

- можливості генеративних систем, що здатні навчатися, коли механічний підбір вагових коефіцієнтів дає можливість налаштувати нейронну мережу на кінцевий результат, який можна порівняти з емпіричним навчанням «через життєвий досвід». Більш сучасні адаптивні системи навчання, наприклад, *Deep Learning*, *Reinforcement Learning*, дозволяють наблизити *AI* до цієї найважливішої області людського пізнання;

- перспективи оволодіння на рівні GPT5 ($1 \cdot 10^{14}$ байтів інформації та $5 \cdot 10^{12}$ параметрів) здатністю кваліфіковано оперувати цифровою інформацією в сфері образотворчого мистецтва, музики, кіно, театру, шляхом створення штучних картин, музичних творів, сценаріїв та нових книжкових сюжетів у стилі геніальних майстрів. Ті галузі знань і навичок, якими людина оперує тільки за допомогою функцій органів зору, слуху, уяви і т. д., GPT5 зможе опосередковано використовувати через «оцифровані» моделі таких даних в своєму регенеративному методі.

Такі моделі вже здатні «розуміти» не лише логіку подій, а й логіку оцифрованих почуттів людини. І досягається це поки що лише простим збільшенням гіперпам'яті, яка знаходиться у високошвидкісній обробці спеціальною нейронною мережею. Результатом можуть стати процеси саморозвитку для *AI* та можливий початок тріумфу її спеціалізованої регенеративної логіки над незрозумілою раніше людською когнітивністю.

Висновки (гіпотеза)

У стандартній ситуації, коли людина, творець *AI*, є суб'єктом для інформаційної системи, яка, в свою чергу, представлена у вигляді залежного об'єкта, вектор зміни ентропії для такої системи, згідно з рівнянням Шеннона, прагне до позитивного зростання $+\Delta S$ з усіма витікаючими наслідками щодо вектора в бік термодинамічної рівноважності.

У той же час в межі, коли ймовірність події прагне до $P(n_i) \approx 1,0$, зміна ентропії ΔS буде прагнути до нуля. І в подальшому, після такого стану системи, ентропія змінюватися не буде. До тих пір, поки не настане якийсь гіпотетичний момент, в який зміна ентропії знову настане.

Але якщо ця система не замкнута і термодинамічно далека від рівноваги, то її наступні стани повинні відображати відносини з ентропією на кордоні біфуркаційних змін, які в принципі неможливі при наявності імовірнісних відношень. Але якщо вони виникають як протиріччя формулі Шеннона, то цей випадок може мати місце тільки тоді, коли *суб'єктність і об'єктність* в системі поміняються місцями. Біфуркація не може відповісти на це питання. Можна тільки припустити, що зміняться відносини між частинами сильно взаємопов'язаної людино-машинної системи.

Це може означати, наприклад, перехід активності від людини до *AI*. І це може статися лише в одному передбачуваному випадку: коли *AI* знаходить внутрішні можливості порівнювати себе з людиною за когнітивними якостями.

Перелік використаних джерел:

1. Crawford K. Atlas of AI: Power, Politics, and the Planetary Costs of Artificial Intelligence. Yale University Press, 2021. 288 p. DOI: <https://doi.org/10.2307/j.ctv1ghv45t>.
2. Lanier J. Ten Arguments for Deleting Your Social Media Accounts Right Now. Henry Holt and Co., 2018. 160 p.
3. Dreyfus H. L. What Computers Still Can't Do: A Critique of Artificial Reason. MIT Press. 1992. 408 p.
4. Chomsky N. The False Promise of ChatGPT. 2023. URL: <https://www.ny-times.com/2023/03/08/opinion/noam-chomsky-chatgpt-ai.html> (дата звернення: 08.05.2024).

5. Marcus G., Devis E. *Rebooting AI: Building Artificial Intelligence We Can Trust*. Pantheon, 2019. 273 p.
6. Mitchell M. *Artificial Intelligence: A Guide for Thinking Humans*. Farrar, Straus and Giroux, 2019. 336 p.
7. LeCun Y. Self-Supervised Learning: The Dark Matter of Intelligence. 2020. URL: <https://ai.meta.com/blog/self-supervised-learning-the-dark-matter-of-intelligence/> (дата звернення: 16.07.2024).
8. Attention is all you need / A. Vaswani et al. *NIPS 2017 : 31st Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, CA, USA, 5-10 December 2017. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
9. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. *Proceedings of NAACL-HLT 2019, Minneapolis, Minnesota*, 2 June - 7 June 2019. Pp. 4171-4186. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>.
10. Language Models are Few-Shot Learners / Brown T. et al. *NIPS'20: Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Vancouver, Canada, 6-12 December 2020. Vol. 33. Pp. 1877-1901. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>.
11. Understanding and improving Layer Normalization / J. Xu et al. *NeurIPS 2019 : 33rd Conference on Neural Information Processing Systems*, Vancouver, Canada, 8-14 December 2019. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.07013>.
12. Markoff J. *Machines of Loving Grace: The Quest for Common Ground Between Humans and Robots*. Ecco, 2015. 400 p.
13. Kurzweil R. *The Singularity is Near*. Viking, 2005. 652 p.
14. Prigogine I., George C. The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems. *Proceeding of the National Academy of Science*. 1983. Vol. 80. Pp. 4590-45945. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.80.14.4590>.

References:

1. K. Crawford, *Atlas of AI: Power, Politics, and the Planetary Costs of Artificial Intelligence*. Yale University Press, 2021. doi: 10.2307/j.ctv1ghv45t.
2. J. Lanier, *Ten Arguments for Deleting Your Social Media Accounts Right Now*. Henry Holt and Co. Publ., 2018.
3. H.L. Dreyfus, *What Computers Still Can't Do: A Critique of Artificial Reason*. MIT Press Publ., 1992.
4. N. Chomsky, The False Promise of ChatGPT. 2023. [Online]. Available: <https://www.ny-times.com/2023/03/08/opinion/noam-chomsky-chatgpt-ai.html>. Accessed on: May 08, 2024.
5. G. Marcus, and E. Devis, *Rebooting AI: Building Artificial Intelligence We Can Trust*. Pantheon Publ., 2019.
6. M. Mitchell, *Artificial Intelligence: A Guide for Thinking Humans*. Farrar, Straus and Giroux Publ., 2019.
7. Y. LeCun, Self-Supervised Learning: The Dark Matter of Intelligence. 2020. [Online]. Available: <https://ai.meta.com/blog/self-supervised-learning-the-dark-matter-of-intelligence/>. Accessed on: July 16, 2024.
8. A. Vaswani et al., «Attention is all you need», in Proc. 31st Conf. on Neural Information Processing Systems NIPS 2017, Long Beach, CA, USA, 2017, pp. 1-11. doi: 10.48550/arXiv.1706.03762.
9. J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, BERT: «Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding», in Proc. NAACL-HLT 2019, Minneapolis, Minnesota, 2019, pp. 4171-4186. doi: 10.48550/arXiv.1810.04805.
10. T. Brown et al., «Language Models are Few-Shot Learners», in Proc. 34th International Conference on Neural Information Processing Systems NIPS'20, Vancouver, Canada, 2020, vol. 33, pp. 1877-1901. doi: 10.48550/arXiv.2005.14165.
11. J. Xu, X. Sun, Z. Zhang, G. Zhao, and J. Lin, «Understanding and improving Layer Normalization», in Proc. 33rd Conference on Neural Information Processing Systems NeurIPS 2019, Vancouver, Canada 2019, pp. 1-11. doi: 10.48550/arXiv.1911.07013.
12. J. Markoff, *Machines of Loving Grace: The Quest for Common Ground Between Humans and Robots*. Ecco Publ., 2015.

13. R. Kurzweil, *The Singularity is Near*. Viking Publ., 2005.
14. I. Prigogine, and C. George, «The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems», *Proceeding of the National Academy of Science*, vol. 80, pp. 4590-45945, 1983. doi: 10.1073/pnas.80.14.4590.

Стаття надійшла 08.10.2024

Стаття прийнята 05.11.2024

УДК 004.9:004.65:004.71: 654.9

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321206

© Грицук В.Ю.¹, Пронін С.В.²

АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МОДЕЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Сьогодні обладнання транспортних засобів надають величезні масиви даних для контролю технічного стану. Процес експлуатації транспортного засобу (ТЗ) постійно пов'язаний з природнім зносом вузлів та компонентів, що, в свою чергу, призводить до погіршення технічних та експлуатаційних характеристик. Для надійності роботи ТЗ потрібен якісний моніторинг компонентів при технічному обслуговуванні (ТО) та діагностування несправностей. Під моніторингом та діагностуванням мається на увазі процес технічного обслуговування з майбутнім виявленням дефектів у системах ТЗ. Аналітика отриманої інформації з використанням технологій Big Data стає вкрай важливою для аналізу та обробки більших обсягів даних, особливо для прогнозування виходу з ладу механізмів. Прогнозоване технічне обслуговування працює краще, ніж ремонт або профілактичне ТО. Відповідно, прогнозування на основі аналізу даних є набагато ефективнішим з точки зору оцінювання експлуатаційної стійкості вузлів в реальному часі та попередження можливих збоїв у їх роботі. Для більш якісного виявлення можливих дефектів доцільно використовувати нейронні мережі, завдяки яким можна отримати більше даних відповідно до технічного стану ТЗ, до показників, що передаються з бортового комп'ютеру. Використовуючи реальні дані з багатьох датчиків і звіти про несправності в роботі вузлів та агрегатів ТЗ, моделі машинного навчання можуть досліджувати патерни інформації і створювати прогнозовані моделі несправностей на основі моніторингу стану в реальному часі. Така інформація передана до системи від ТЗ обробляється за допомогою нейронних мереж та на виході отримуємо більш якісний аналіз стану ТЗ на предмет несправностей, що підвищує якість технічного обслуговування. У статті розглянуто особливості діагностування сучасних ТЗ, наведено можливі варіанти отримання даних з ТЗ та приклад розробки нейронної мережі з налаштуванням оптимальних параметрів машинного навчання і для прогностичної діагностики за допомогою наявних даних.

Ключові слова: прогностичне технічне обслуговування, моніторинг, нейронні мережі, прогнозування ремонту, Big Data.

V.Yu. Hritsuk, S.V. Pronin. Analysis and justification of model selection for vehicle parameters monitoring and maintenance prediction. Today, vehicle equipment provides huge amounts of data for technical condition monitoring. The process of vehicle operation

¹ аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: 0000-0002-3780-7815, valeri.gritsuk@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: 0000-0002-7475-621X

is constantly associated with the natural wear and tear of components, which in turn leads to a deterioration in technical and operational characteristics. For the reliability of the vehicle operation, high-quality component monitoring during maintenance and fault diagnosis is required. Monitoring and diagnostics mean the process of maintenance with the future detection of defects in vehicle systems. Analytics of the information obtained using Big Data technologies are becoming extremely important for analyzing and processing large amounts of data, especially for predicting the failure of mechanisms. Predictive maintenance works better than repair or preventive maintenance. Accordingly, data-driven forecasting is much more effective in terms of assessing the operational stability of units in real time and preventing possible failures in their operation. For better detection of possible defects, it is advisable to use neural networks, which can provide more data on the compliance of the technical condition of the vehicle with the indicators transmitted from the on-board computer. Using real data from multiple sensors and reports on malfunctions in the operation of vehicle components and assemblies, machine learning models can explore patterns of information and create predictive fault models based on real-time condition monitoring. Such information transmitted to the system from the vehicle is processed using neural networks and the output is a better analysis of the vehicle's condition for faults, which improves the quality of maintenance. The article discusses the peculiarities of diagnosing modern vehicles, provides possible options for obtaining data from vehicles and an example of developing neural networks with the setting of optimal machine learning parameters and for predictive diagnostics using available data.

Keywords: predictive maintenance, monitoring, neural networks, repair prediction, Big Data.

Постановка проблеми. Типовим рішенням для запобігання виходу з ладу компонентів транспортних засобів (ТЗ) є проведення профілактичного обслуговування або запланованих технічних обслуговувань [1-4]. На основі використання статистичних даних можна реалізувати профілактичне технічне обслуговування (ТО) таким чином, що критичні вузли будуть замінюватись ще до того, як вони почнуть відмовляти. Втім, через індивідуальні характеристики кожного окремого ТЗ важко реалізувати такий підхід до всього автопарку, а також економічно неефективно проводити ремонт кожного окремого компонента за певним планом. На даний момент ТЗ є одними з найбільш просунутими у використанні Інтернету речей (IoT). Ця технологія дозволяє розглядати всі додатки, пов'язані з контролем та обслуговуванням транспортних засобів, дає можливість аналізувати параметри транспортного засобу і попереджати водіїв про будь-які критичні проблеми.

Існує дві основні стратегії технічного обслуговування, що активно застосовуються в управлінні транспортними засобами, а саме: експлуатація до відмови та профілактичне технічне обслуговування. Технічне обслуговування до відмови – це техніка оперативного реагування. Технічне обслуговування не проводиться до тих пір, поки не станеться несправність. Прогнозоване технічне обслуговування розглядається як орієнтована на час стратегія технічного обслуговування. При застосуванні профілактичного обслуговування автомобіль проходить планову перевірку через певний проміжок часу. Складність прогностичного технічного обслуговування полягає у тому, що важко передбачити періодичність планових ТО. Якщо його виконувати занадто часто, витрати на ТО зростуть і буде втрачено частину корисного ресурсу ТЗ. Прогнозування напрацювання до відмов може принести відчутні результати для ефективності технічного обслуговування. Завдяки такому прогнозуванню можна вчасно здійснити технічне обслуговування, що дасть змогу запобігти виникненню несправностей та знизить фінансові витрати на технічне обслуговування.

Як техніка статистичної обробки даних, так і машинне навчання є важливими для прогнозування технічного обслуговування. У ретроспективі, коли обсяг даних був невеликим і низько розмірним, переважали статистичні методи. У добу великих даних, зі збільшенням обсягу і підвищенням структури даних, машинне навчання дозволяє отримати більше рішень завдяки інтелектуальному аналізу даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій У роботах [5-7] система моніторингу транспортного засобу використовує ELM327 як зчитувач OBD-II для отримання потрібних даних

(наприклад, частота обертання двигуна, швидкість транспортного засобу, температура охолоджуючої рідини та прискорення педалей) та їх передачі на смартфон користувача через Bluetooth.

Та ж сама платформа може використовувати окремий додаток для отримання даних для подальшого аналізу поведінки водія на основі даних ТЗ [8].

Також було виявлено, що для збору даних для подальшого використання краще використовувати моделі IoV та Штучного інтелекту (ШІ), оскільки основною структурою IoT є інтегрування багатьох розумних сенсорів, датчиків, пристроїв збору даних і процесорів периферійних обчислень [9-11].

Дослідниками у роботах [12-15] було запропоновано використання IoT датчиків та пристроїв, що збирають у режимі реального часу дані про технічні параметри системи ТЗ. Потім ці дані надходять на центральний сервер або хмарну платформу, де вони можуть бути оброблені і використані для моніторингу загального стану транспортного засобу.

У роботі [16] для прогнозування експлуатаційної надійності автомобільних двигунів запропоновано модель дерев умовного виводу. У цьому дослідженні деревоподібна регресійна модель була поєднана з моделлю пропорційної небезпеки Кокса. Представлена в цій роботі гібридна модель може запропонувати просту інтерпретацію та дозволяє виявляти важливі параметри.

Мета та постановка задачі. Одна з найбільш ефективних стратегій для підтримки ТЗ у справному стані – технічне обслуговування. Але її неможливо застосовувати без діагностичних робіт та засобів для проведення такої роботи, щоб дізнатись повну індивідуальну інформацію про ТЗ (цілком, окремо по вузлах чи системах). Ключовим у цій роботі є вирішення задачі зменшення витрат та оптимізація діагностування теперішніх та майбутніх поломок за рахунок впровадження нейромережевої моделі аналізу даних, отриманих з ТЗ.

Виклад основного матеріалу. У будь-якому сучасному ТЗ знаходиться більше сотні датчиків, за допомогою яких можна проводити моніторинг. Завдяки використанню цифрових електронних систем можна постійно відстежувати найважливіші параметри системи (тиск масла, температуру охолоджуючої рідини, рівень вихлопних газів) і повідомляти про відхилення від норми. Коли дані з датчиків відстежуються і виконується моніторинг, то можна спрогнозувати, в якому стані перебуває транспортний засіб [17]. Відповідно, основним завданням системи експлуатації автомобілів є підтримання їхнього технічного стану та надійності на рівні, достатньому для здійснення ними заданих функцій. Для правильного ТО збираються дані про продуктивність, щоб вивчати їх в автономному режимі і при необхідності відправляти транспортні засоби на обслуговування.

Широкий діапазон умов і режимів експлуатації, а також варіація початкових показників якості машини, призводять до значної дисперсії її напружень до граничного стану (рис. 1). Тому досить важливо мати методи і засоби для оцінки технічного стану машини, тобто отримання індивідуальної інформації про приховані і назріваючі відмови, залишковий ресурс, причини порушення працездатності тощо [6, 8]. Засобом отримання такої інформації буде технічна діагностика. Технічна діагностика безпосередньо поєднується з теорією надійності, оскільки головною її метою є своєчасне виявлення непрацездатного стану ТЗ, прогнозування залишкового ресурсу, що, зрештою, спрямовано на підвищення надійності та ефективності експлуатації техніки.

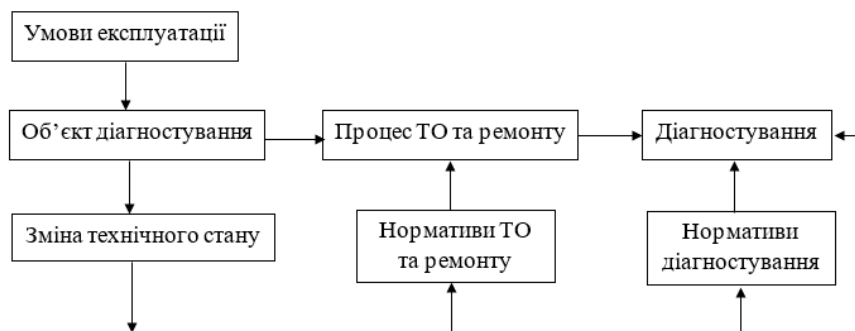


Рис. 1 – Схема керування технічним станом об'єкту

З цього випливає, що діагностуванням називається процес визначення технічного стану об'єкта без його розбирання шляхом вимірювання величин, що характеризують його стан, і зіставлення їх із нормативами. Діагностування не є самостійним технологічним процесом, воно є елементом системи ТО і ремонту, що забезпечує індивідуальну інформацію про технічний стан об'єкта. Наявність таких даних дає змогу для оптимізації режимів регламентного контролю, своєчасного виявлення потреби об'єкта в ремонті та ТО, перевірці якості їх виконання, тобто для комплексного управління технічним станом [5, 18-20].

Діагностування є якісно досконалішою формою контрольно-вимірювальних робіт і відрізняється такими ознаками:

- об'єктивністю і достовірністю оцінки технічного стану складних об'єктів без їхнього розбирання;
- можливістю визначення технічного стану за вихідними параметрами;
- появою умов для прогнозування технічного стану об'єкта, його залишкового ресурсу.

Алгоритм діагностування являє собою структурну послідовність діагностичних, регулювальних і ремонтних операцій. Він визначає виведення об'єкта на тестовий режим, постановку первинного діагнозу, перехід до наступного елемента, регулювальні та ремонтні операції, повторні та заключні перевірки [7].

Діагностування включає в себе три основних етапи:

- фіксування відхилень діагностичних параметрів від їх номінальних значень;
- аналіз характеру і причин походження цих відхилень;
- встановлення розміру запасу ресурсу працездатної експлуатації [21].

Діагностичні засоби можна класифікувати як бортові (вбудовані) та небортові (зовнішні) (рис. 2). Серед загальновідомих сучасних методів діагностування переважне місце займає комп'ютерна діагностика, що дозволяє виконувати тестування електронних і виконавчих систем автомобіля, що впливають на функціонування бортових комплексів, а також виявляють несправності, пов'язані з експлуатацією системи електроніки автомобіля [22]. На підставі одержаних даних формується діагностична карта несправностей для подальшого ремонту та усунення неполадок, пов'язаних з обладнанням та механізмами.

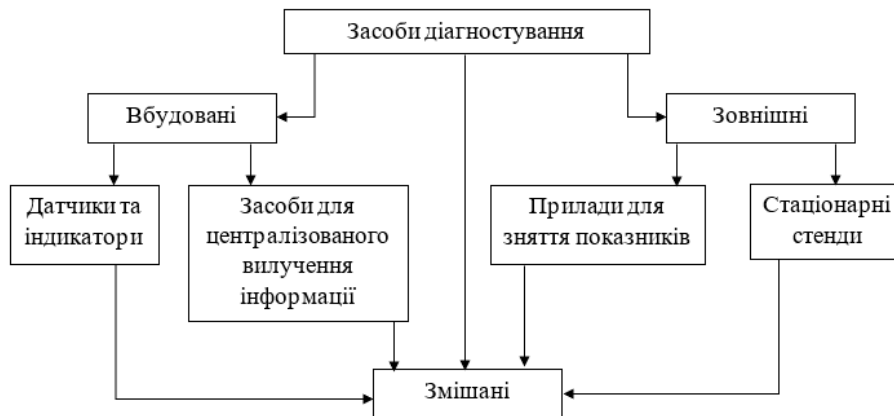


Рис. 2 – Класифікація засобів діагностики ТЗ

Електронні бортові комплекси автомобіля обладнані системами для самодіагностики. Такі системи потрібні для управління виконавчими механізмами автомобіля, безперервного функціонування в момент запуску та роботи двигуна. Електронні системи інформують про можливі поломки вузлів і агрегатів, а також інформують про можливі дефекти в вузлах і агрегатах, а крім того, відстежують міжсервісні інтервали і попереджають про необхідність своєчасного проходження технічного обслуговування ТЗ [18, 23].

Дії з прогнозованим моніторингом та діагностуванням можна планувати на основі віку або стану (рівня деградації) ТЗ. У системі кожен транспортний засіб повинен мати набір радіочастотних ідентифікаційних датчиків-міток, прикріплених до них [24]. Кожного разу коли ТЗ

під'єднується до Інтернету через мережу, то процесор для обробки даних отримує дані про ТЗ та перевіряє їх на наявність передбачених типів порушень. Далі ці записи передаються в БД та порівнюються з записами в хмарі, які були передані до того. Дані будуть зчитуватися з датчиків і синхронізуватися з хмарними даними. Використання хмарних сховищ для збереження даних додає пропонованій системі таких переваг, як масштабованість, зручність та гнучкість. Дані про транспортні засоби та водіїв зберігаються в центрі обробки даних.

Збір даних є ключовим етапом та разом з цим потрібно звернути увагу на попередню обробку даних, виділення особливостей, побудову класифікаційної схеми та їх аналіз [25]. Для впровадження ефективного прогностичного моніторингу (рис. 3) потрібен точний набір даних. Точні та якісні дані дозволять отримати якісний результат, що буде відображати ефективність запропонованої моделі. Дані будуть збиратися з багатьох джерел, таких як регулярні дані з датчиків, звіти про технічне обслуговування ТЗ та інші. Після збору даних необхідна попередня обробка даних. Попередня обробка даних передбачає маркування даних, їх очищення та конвертацію [26-28].

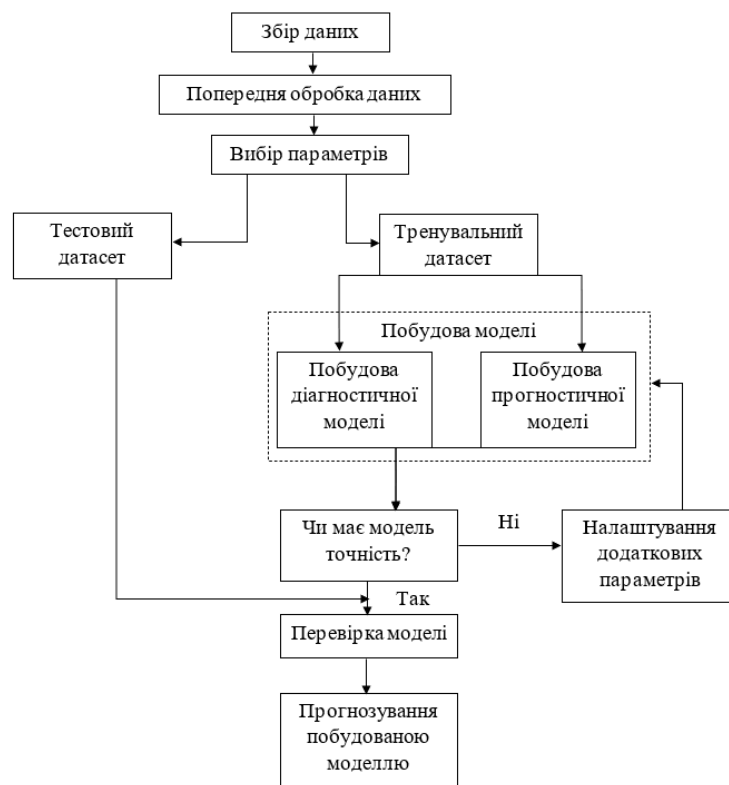


Рис. 3 – Структурна схема побудови прогностичного моніторингу

Доступ до більшості інформації, що описує особливості стану ТЗ, можна отримати через CAN-шину транспортного засобу. CAN (Controller Area Network) – це внутрішня мережа, що з'єднує усі датчики автомобіля і через яку вони взаємодіють одне з одним. Безпосередньо під'єднатися до неї дуже проблематично: тому зазвичай використовується інтерфейс OBD, що надає змогу отримувати дані з CAN-шини. Процес збору даних полягає у підключенні до мережі CAN портативного комп'ютера (або датчика OBD II) з метою отримання даних під час експериментів [29-32].

Основними етапами при зборі даних є:

- Налаштування ініціювання зв'язку – встановлення конкретного шляху до СОМ-порту, до якого підключено зчитувач даних, а також швидкості передачі даних.
- Налаштування конфігурації – встановлення формату відповідей на запити даних.

- Запити параметрів і фіксація відповідей – зациклення кожні декілька секунд для безперервного надсилання запитів параметрів до зчитувача і збереження відповідей необроблених даних [27, 33].

Коли мікропроцесор (мікрокомп'ютерний блок) виявляє наявність інтернет-з'єднання, необроблені дані з EBU автоматично передаються на веб-сервер за допомогою пост-запитів. Відповідно, необхідна підпрограма, яка у фоновому режимі роботи основної програми реєстрації даних періодично здійснює перевірку наявності з'єднання з мережею, оскільки мікропроцесор не завжди може бути під'єднаний до Інтернету.

У зв'язку з тим, що останнім часом багато виробників обирають CAN в якості основної шини у внутрішній системі автомобіля, CAN може бути встановлений як основний комунікаційний протокол між автомобілем і зовнішнім OBD-інтерфейсом. Інтеграція протоколів зв'язку шини CAN передбачає ідентифікацію протоколу зв'язку, який використовується у відповідній моделі автомобіля. Однак при визначенні комунікаційних властивостей шини CAN для визначення режиму зв'язку помилкові пакети можуть спричинити перехід шини CAN у вимкнений стан, що призведе до втрати зв'язку з автомобілем і, як результат, до аварійного завершення роботи системи [31, 34, 35].

Для отримання даних аналізуються чотири основні системи автомобіля: система запалювання, паливна система, вихлопна система та система охолодження. Ці системи відстежуються складними комп'ютерними системами управління. Датчики передають інформацію про несправності в блок управління електронікою (ECU). ECU – це мікрокомп'ютер, який складається з безлічі електронних компонентів і схем, включаючи багато напівпровідникових приладів. Його вхідний пристрій отримує вхідні дані у вигляді електричних сигналів. Ці сигнали збираються від датчиків, розташованих у різних місцях двигуна. Блок обробки порівнює вхідні дані з даними, що знаходяться в пам'яті. Блок пам'яті містить базову інформацію про роботу двигуна. Пристрій передачі імпульсів подає електричні сигнали на електромагнітний клапан впорскування. Основна функція ECU в електричній системі впорскування палива полягає в управлінні пульсацією через форсунку, частотою обертання холостого ходу, моментом запалювання і паливним насосом. Блок управління може швидко пристосуватись до зміни умов, використовуючи запрограмовану карту характеристик, що зберігається в блоці пам'яті. Мета роботи блоку управління – максимізувати потужність двигуна з мінімальним рівнем викидів вихлопних газів і мінімальною витратою палива. Інструменти сканера OBD II завантажують коди несправностей бортової мережі, зв'язуючись з блоком управління, щоб визначити, який саме датчик не відповідає [36-43].

У сучасних транспортних засобах зі збільшенням кількості електронних блоків керування зростає і рівень складності бортових мереж, оскільки кожен окремий компонент має власні вимоги до швидкості передачі даних і затримок. Кількість електронних блоків управління в сучасних інтелектуальних транспортних засобах постійно зростає, щоб забезпечити транспортний засіб різноманітними новими функціональними можливостями для безпеки, захисту, зручності і т.д. [39]. Крім того, для з'єднання великої кількості електронних блоків управління було розроблено кілька автомобільних протоколів, і дослідження все ще тривають з метою створення більш досконалих функцій. Крім того, ECU (рис. 4) зазвичай підключаються до більш ніж однієї шини через їх диверсифіковану функціональність, включаючи управління та моніторинг транспортного засобу [40].

Однак у практичних випадках діагностики існує багато станів несправності для одного і того ж механічного обладнання. Тоді для побудови послідовної системи діагностування для ідентифікації несправностей і розпізнавання типів несправностей застосовується теорія можливостей [44]. Теорія можливостей – це математична теорія для отримання нечіткого висновку при обробці нечіткої інформації [45], яку можна представити у вигляді:

$$p(x_i) = \sum_{k=1}^N \min\{\lambda_i, \lambda_k\}, (i, k = 0, 1, 2, \dots, N),$$

$$\lambda_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{m}{\eta} \left(\frac{x - x_0}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\frac{(x - x_0)^m}{\eta}\right\} dx, x_i = \bar{x} + \frac{i - N}{N} \sigma,$$

$$\lambda_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} \frac{m}{\eta} \left(\frac{x - x_0}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\frac{(x - x_0)^m}{\eta}\right\} dx, x_k = \bar{x} + \frac{k - N}{N} \sigma.$$

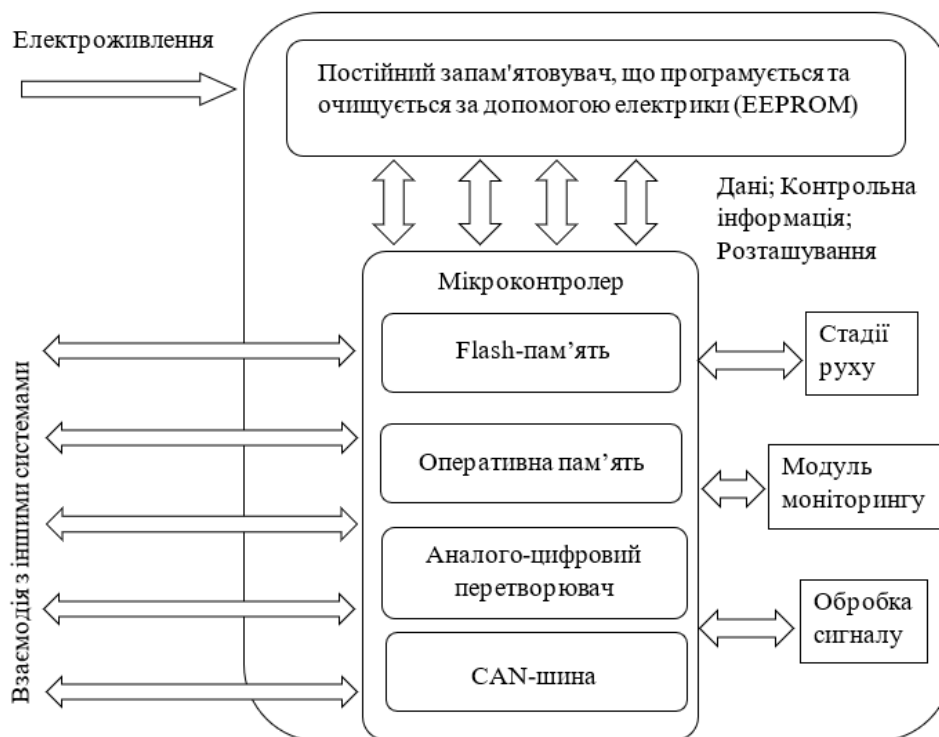


Рис. 4 – Внутрішня конфігурація ECU [32]

Звідси можна отримати функції можливостей для відомих станів та стану діагностування. Ці стани, які були точно діагностовано, будуть використовуватися для визначення стандартів діагностування в якості зразків. Варто враховувати, що існують деякі несправності, які ще не виникали, і тоді ці стани називаються «невідомими станами». Таким чином, не існує жодного способу обчислити безпосередньо функцію ймовірності невідомого стану. Для того, щоб підвищити діагностичні можливості та покращити чутливість ідентифікації, в роботі [44] був запропонований наступний непрямий метод для отримання функції ймовірності невідомого стану:

$$M_{un} = \max \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N M_i, 0 \right\}, (i = 1, 2, \dots, N),$$

де M_i – функції можливості стану, а N – загальна кількість станів.

Для побудови системи прогностичного моніторингу доцільно використати платформу машинного навчання та візуального аналізу даних Orange Data Mining [46]. Після аналізу інформації, яка поступає з OBD II сканера, буде побудовано інформаційну БД, в яку будуть завантажуватись всі параметри з ТЗ. Після цього за допомогою no-code засобів можливо побудувати прогностичну систему, яка використовує кілька алгоритмів (Random Forest, Neural Network, Logistic Regression). На прикладі даних про технічний стан ТЗ [26, 47] побудуємо аналітичну і прогностичну модель, за допомогою якої нейронна мережа буде навчатись.

Точне прогнозування виходу з ладу та залишкового ресурсу обладнання допомагає розробити адекватне планування технічного обслуговування. Для прогнозування використовуються джерела даних і відповідні методи моніторингу продуктивності обладнання, якості продукції та прогнозування можливої відмови обладнання. Моніторинг допомагає забезпечити раннє виявлення несправностей і дозволяє виявити проблеми, що виникають, до того, як станеться відмова [48].

До набору даних можуть входити ознаки та параметри, пов'язані з роботою двигуна транспортного засобу, такі як оберти двигуна, температура, тиск та інші дані, отримані з датчиків. Він також може включати метадані про транспортний засіб, такі як марка, модель, рік випуску і пробіг. Далі ці дані (рис. 5) розділяються на ті, що будуть використовуватись для навчання

(тренувальний набір) та тестування (тестувальний набір). Обрані дані для побудови діляться на ці набори за фіксованим принципом 80/20.

80 19
Data Sample: 1-100: 80 instances, 7 variables
Features: 6 numeric (no missing values)
Target: categorical
Remaining Data: 1-100: 19 instances, 7 variables
Features: 6 numeric (no missing values)
Target: categorical

Рис. 5 – Результат розділення даних

Основним алгоритмом навчання, який використовується для навчання штучної нейронної мережі (ШНМ) з навчанням під контролем, є зворотне поширення, яке має дві робочі фази: пряме поширення та зворотне поширення [49, 50]. Він базується на алгоритмі градієнтного спуску (GD), який обчислює градієнти по всьому набору даних, так як легко поміщається в пам'яті і є швидким в обчисленнях. Це призводить до великої кількості ітерацій і збільшує ризик потрапити в пастку локальних оптимумів з ранньою збіжністю. У зв'язку з цими проблемами в роботі [50] було запропоновано метод міні-пакетного градієнтного спуску. Навчальний набір даних розбивається на партії фіксованого розміру для використання в процесі навчання в цьому методі. Обчислюється загальна похибка і ваги для кожної підпачки оновлюються. Коли значення міні-партії дорівнює «1», використовується алгоритм стохастичного градієнтного спуску. У цьому випадку похибка обчислюється для однієї вибірки за раз і ваги також оновлюються, що призводить до швидшої збіжності за рахунок прямої векторизації даних. Значення помилки потім поширюється назад через мережі, а ваги оновлюються за допомогою GD у зворотному напрямку кривизни. Параметри мережі, що підлягають оптимізації, оновлюються відповідно як

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla_{\theta} J(\theta_t),$$

де η – швидкість навчання, $\nabla_{\theta} J(\theta_t)$ – градієнт функції втрат $J(\theta_t)$ відносно θ_t .

Алгоритм стохастичного градієнтного спуску (SGD) обчислює втрачену функцію для однієї навчальної вибірки за раз, замість того, щоб розглядати всі навчальні вибірки даних. Таким чином можна уникнути проблем дефіциту пам'яті. SGD був створений для усунення недоліків алгоритму пакетного градієнтного спуску. Проблема використання SGD полягає у визначенні правильного значення швидкості навчання, щоб уникнути коливань і досягти глобального оптимуму. Для оновлення параметрів використовується наступне рівняння [47]

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla_{\theta} J(\theta_t; x^{(i)}; y^{(i)}),$$

де η – швидкість навчання, $\nabla_{\theta} J(\theta_t)$ – градієнт функції втрат $J(\theta_t)$ відносно θ_t . Також $x^{(i)}$ та $y^{(i)}$ представляють навчальні дані у вигляді пар входів-виходів. Якщо крива функції втрат має перегини, де один вимір має нахил вгору, а інший – вниз, алгоритм SGD працює погано.

Інший варіант – градієнтний спуск з імпульсом. Крок навчання в методах градієнтного спуску бажано збільшувати, щоб швидше досягти найкращого результату. Коли кроки навчання дуже великі, глобального оптимуму не завжди можна досягти. Ці великі кроки можуть мати прямий вплив на час, необхідний для досягнення глобального оптимуму. Для вирішення цих проблем в роботі [51] було запропоновано метод градієнтного спуску за імпульсом. Він обмежує швидкість наступного кроку навчання, використовуючи середню швидкість попередніх кроків навчання. У цьому методі динамічне середнє минулих градієнтів (m_{t-1}) експоненціально зменшується і зберігається. Напрямок руху визначається з урахуванням цих динамічних усереднень. Таким чином, кроки процесу навчання рухаються швидше до найкращого результату з меншим відхиленням [52]. Правило оновлення може бути виражене у вигляді

$$m_t = \gamma m_{t-1} + \eta \nabla_{\theta} J(\theta_t),$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - m_t,$$

де γ – параметр імпульсу, який зазвичай має значення 0.9 або близьке до нього.

Ще одним варіантом навчання є алгоритм адаптивного градієнта (AdaGrad), який ділить компонент швидкості навчання на квадратний корінь з v_t , який є сумою поточного і попереднього квадратів градієнта до моменту часу t . Компонент градієнта, як і в SGD, залишається незмінним. AdaGrad здійснює відповідні оновлення для кожного параметра, використовуючи різні швидкості навчання для кожного кроку. Найважливішою перевагою використання AdaGrad є те, що швидкість навчання не регулюється вручну, як в інших системах адаптивного навчання [51]. Рівняння оновлення AdaGrad можуть бути виражені як

$$g_t = \nabla_{\theta} J(\theta_t),$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{v_t + \epsilon}} g_t,$$

де ϵ – згладжуючий коефіцієнт, який дозволяє уникнути ділення на нуль (зазвичай встановлюється рівним 10^{-8}), а v_t – експоненціальна змінна середнього градієнта.

На рис. 6 зображено загальний вигляд системи, на якій видно, що до блоку отриманих результатів («test and score») від даних направлено два набори (тестовий та тренувальні). Окрім цього, навчання відбувається за допомогою декількох алгоритмів (Random Forest, Neural Network, Logistic Regression). Після цього результати потрапляють на блок «predictions», який відповідає за прогнозування системи для обробки тестових даних.

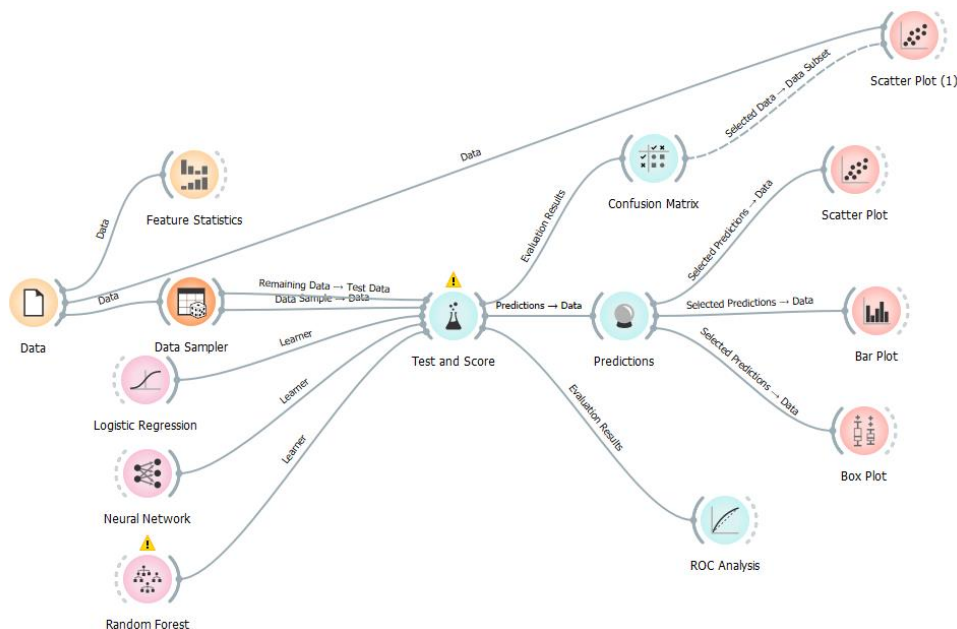


Рис. 6 – Загальний вигляд побудованої системи

Основними алгоритмами при побудові прогностичної моделі є: логістичної регресія, нейронна мережа та випадковий ліс. Для логістичної регресії було обрано тип регуляризації «Ridge (L2)», що використовується для запобігання надмірному узгодженню за рахунок виключення великих коефіцієнтів. Ступінь регуляризації в даній роботі налаштований за допомогою параметра «C» (встановлено на 1, що вказує на помірний рівень регуляризації) та встановлюється за допомогою бігунка, що забезпечує певний баланс між рівнем складності моделі та якістю навчання. Параметри нейронної мережі містять 200 нейронів у прихованому шарі та нелінійною функцією активації «tanh». Регулятор для оптимізації задано як «Adam», а регуляризацію визначено зі значенням $\alpha = 0.0001$. Процес навчання передбачає максимум 500 ітерацій, а опція «Повторюване навчання» гарантує отримання однакових результатів у всіх ітераціях та забезпечує отримання визначених результатів шляхом фіксації випадкових вхідних параметрів. В моделі випадкового лісу використано 10 дерев рішень, обсяг підмножини для виділення атрибутів під час розбиття встановлено на позначку в 5, що враховуються при кожному розбитті. Також включено збалансований класовий розподіл, а навчання є повторювальним. Контроль росту передбачає

обмеження глибини дерева до 3 і запобігання розбиттю на підмножини, розмір яких менший за 5 екземплярів.

Після вибору параметрів роботи отримуємо записані в блоки результати по тренувальним даним та тестовим даним (рис. 7).

Model	AUC	CA	F1	Prec	Recall	MCC
Neural Network	0.643	0.684	0.644	0.680	0.684	0.268
Random Forest	0.643	0.737	0.732	0.731	0.737	0.420
Logistic Regression	0.702	0.684	0.644	0.680	0.684	0.268

а)

Model	AUC	CA	F1	Prec	Recall	MCC
Neural Network	0.643	0.684	0.644	0.680	0.684	0.268
Random Forest	0.643	0.737	0.732	0.731	0.737	0.420
Logistic Regression	0.702	0.684	0.644	0.680	0.684	0.268

б)

Рис. 7 – Блок отриманих результатів роботи нейронних мереж: а) для тренувальних даних; б) для тестових даних

При роботі з програмним середовищем Orange можливо індивідуально налаштувати всі параметри системи, які знадобляться в роботі. Основою в роботі є датасет з параметрами ТЗ. Цільовий показник, який потрібно отримати, – необхідність в ремонті або ні зі значеннями «need gear» та «no gear». До набору даних можуть входити різні ознаки та параметри, пов'язані з роботою двигуна транспортного засобу, такі як оберти двигуна, температура, тиск та інші дані з датчиків. Він також може включати метадані про транспортний засіб, такі як марка, модель, рік випуску і пробіг. Так як таких різномірних даних з ТЗ отримується багато, потрібно виявити, які будуть використовуватись при побудові нейронної мережі, а саме, які впливають на результат. В роботі було виділено 6 ключових параметрів з датасету.

Вибрані екземпляри даних передаються на блок Data Sampler, в якому реалізується вибірка даних, а саме дані поділяються на тестовий набір та тренувальний за пропорціями 80/20 (де 80 показників зі 100 – для тренувального набору). Набір даних для тестування було вилучено з ШНМ на етапі навчання, щоб переконатися, що ШНМ зможе передбачити стан несправності, спираючись лише на свій власний досвід навчання.

Разом з цим, окремими блоками є три варіанти алгоритмів, які, як і дані з блоку Data Sampler, під'єднуються до блоку «Test and Score», в якому тестуються та навчаються алгоритми навчання даних. В цьому блоці візуалізуються результати алгоритмів нейронної мережі по певним коефіцієнтам (Area under ROC, Classification accuracy, F-1, Precision, Recall, Matthews correlation coefficient).

За алгоритми відповідають блоки логістичної регресії, випадкового лісу та нейронної мережі. Першим є алгоритм класифікації логістичної регресії з регуляризациєю LASSO (L1) або ridge (L2). Далі – випадковий ліс, який створює множину дерев рішень. Для побудови кожного дерева береться початкова вибірка з тренувальних даних. При побудові кожного окремого дерева формується довільна підмножина ознак, з якої вибирається найкраща для розбиття. Другим варіантом алгоритму є алгоритм багаторівневого перцептрона (MLP) із зворотним поширенням (на рис. 6 блок Neural Network). При побудові даного алгоритму потрібно визначити в меню певні параметри:

- кількість нейронів на прихований шар;
- функція активації для прихованого шару, яка може бути як логістична сигмоїдна функція, гіперболічна функція тангенса кута, випрямлена лінійна одинична функція або активація без операцій;
- регулятор для оптимізації ваг (L-BFGS-B, SGD, Adam, Alpha).

Після отримання даних від даних алгоритмів інформація з блоку «Test and Score» йде на блок «Confusion Matrix», в якому дана матриця плутанини показує кількість/співвідношення між прогнозованим і фактичним значеннями класів. Виділення елементів у цій матриці дає відповідні екземпляри у вихідному сигналі. Таким чином, можна бачити, які конкретні приклади були неправильно класифіковані і як саме за певним розподілом:

- Істинно позитивні (TP): кількість позитивних прикладів, які належать до позитивного класу і прогножуються як позитивні;
- Істинно негативні (TN): кількість прикладів, які належать до негативного класу і прогножуються як негативні;
- Хибно-позитивний (FP): кількість прикладів, які належать до негативного класу, але передбачені моделлю як позитивні;
- Хибно-негативні (FN): кількість прикладів, які належать до позитивного класу, але прогножуються моделлю як негативні [53].

Відповідно до результатів, зображених на рис. 8, побудуємо окрему матрицю плутанини для цих алгоритмів і проаналізуємо результати. Аналогічно будемо те ж саме, але вже для тестової вибірки.

Engine Condition	Neural Network	Random Forest	Logistic Regression	1 Network (need r	al Network (no re	om Forest (need r	om Forest (no re	Regression (neec	c Regression (no	Fold	Engine rpm	Lub oil pressure	Fuel pressure	Coolant pressure	lub oil temp	Coolant temp
need repair	need repair	need repair	need repair	0.991808	0.00819218	0.856212	0.143788	0.942886	0.0571142	1	666	2.51794	8.94487	2.78163	74.3556	68.1369
need repair	need repair	need repair	need repair	0.999184	0.000816287	0.756212	0.243788	0.946521	0.0534795	1	805	2.91303	17.569	1.74664	74.718	75.2551
need repair	need repair	need repair	need repair	0.574741	0.425259	0.935	0.065	0.627178	0.372822	1	538	4.26	7.69421	2.08363	80.1835	81.1808
need repair	need repair	need repair	need repair	0.835351	0.164649	0.8	0.2	0.834161	0.165839	1	704	2.26787	10.0127	2.14751	76.2482	88.9332
need repair	need repair	need repair	need repair	0.991102	0.00889755	0.756212	0.243788	0.908388	0.0916117	1	691	2.38106	8.00188	1.47438	75.0928	71.6119
need repair	need repair	need repair	need repair	0.831376	0.168624	0.735	0.265	0.77594	0.22396	1	790	2.49359	11.7909	3.17988	84.1442	81.6322
no repair	no repair	no repair	no repair	0.431536	0.568464	0.408660	0.59132	0.361281	0.638719	1	697	3.81376	1.83378	0.794514	78.634	86.7292
no repair	no repair	no repair	no repair	0.978887	0.0211126	0.911864	0.088136	0.949499	0.0515005	1	382	2.16255	7.77402	2.72735	77.0009	71.6238
no repair	no repair	no repair	no repair	0.158536	0.841464	0.463003	0.536997	0.416727	0.583273	1	596	4.21049	4.60145	1.31346	84.4637	76.6308
no repair	no repair	no repair	no repair	0.979806	0.0201938	0.941791	0.058209	0.526686	0.473314	1	657	4.2805	2.952	3.97609	75.7486	87.192
no repair	no repair	no repair	no repair	0.981856	0.0181442	1	0	0.868015	0.131985	1	495	3.37822	7.37628	3.09076	77.264	73.807
no repair	no repair	no repair	no repair	0.933911	0.0660891	0.409722	0.590278	0.868328	0.131672	1	876	2.94161	16.1939	2.4645	77.6409	82.4457
no repair	no repair	no repair	no repair	0.96116	0.0388396	0.835	0.165	0.841922	0.158078	1	583	3.39794	6.14666	1.62738	76.2243	70.6144
no repair	no repair	no repair	no repair	0.987062	0.0129384	0.035	0.965	0.885875	0.114125	1	779	2.02241	13.7866	1.02677	77.1272	84.8581
no repair	no repair	no repair	no repair	0.96631	0.0336896	0.7	0.3	0.727081	0.272919	1	664	3.97849	7.5371	4.85397	76.4129	84.5655
no repair	no repair	no repair	no repair	0.645784	0.354216	0.8	0.2	0.73639	0.26361	1	1053	2.53385	4.21219	4.70547	75.8421	75.9816
no repair	no repair	no repair	no repair	0.614352	0.385648	0.835	0.165	0.637588	0.362412	1	590	2.45449	6.65057	2.45012	83.6614	75.2497
need repair	need repair	no repair	need repair	0.510173	0.489827	0.239435	0.760565	0.554489	0.445511	1	1007	2.9857	4.77586	2.04503	76.9034	82.0885
no repair	no repair	no repair	no repair	0.41114	0.58886	0.467069	0.532931	0.475841	0.524159	1	1221	3.98923	6.67923	2.21425	76.4012	75.6698

Рис. 8 – Блок «predictions» для розробленого алгоритму при тестовому наборі даних

Як бачимо на рис. 9, нейронна мережа та випадковий ліс є більш точними в хибно-негативних та хибно-позитивних показниках, ніж логістична регресія, яка має похибку відносно цих двох алгоритмів. З рис. 10 вже можемо побачити, що для тестових даних всі алгоритми справились з приблизно однаковими результатами.

		Predicted		Σ
		need repair	no repair	
Actual	need repair	52	0	52
	no repair	5	23	28
Σ		57	23	80

а)

		Predicted		Σ
		need repair	no repair	
Actual	need repair	50	2	52
	no repair	2	26	28
Σ		52	28	80

б)

		Predicted		Σ
		need repair	no repair	
Actual	need repair	43	9	52
	no repair	19	9	28
Σ		62	18	80

в)

Рис. 9 – Матриці плутанини для тренувальних даних: а) нейронної мережі, б) випадкового лісу, в) логістичної регресії

Використовуючи матрицю плутанини, ми змогли виміряти ефективність моделі. Значення ТР представляє ситуацію, коли фактична помилка виникає, як і передбачалося моделлю, в межах часового інтервалу вікна прогнозування. І навпаки, FR показує передбачення помилки моделювання, коли фактично помилки не було.

		Predicted		Σ
		need repair	no repair	
Actual	need repair	11	1	12
	no repair	5	2	7
Σ		16	3	19

а)

		Predicted		Σ
		need repair	no repair	
Actual	need repair	10	2	12
	no repair	3	4	7
Σ		13	6	19

б)

		Predicted		Σ
		need repair	no repair	
Actual	need repair	11	1	12
	no repair	5	2	7
Σ		16	3	19

в)

Рис. 10 – Матриці плутанини для тестових даних: а) нейронної мережі, б) випадкового лісу, в) логістичної регресії

Висновки

В ході дослідження було розроблено алгоритм для проведення прогнозування необхідності технічного обслуговування транспортних засобів за допомогою програмних продуктів на базі Orange Data Mining. Отримані результати дають можливість використовувати даний програмний продукт для більш глибокого аналізу та дають можливість використовувати різні дані для побудови нейронних мереж при розробці прогностичної моделі технічного обслуговування.

Перелік використаних джерел:

1. Грицук В. Ю., Грицук Ю. В. Прогностичне обслуговування в автомобільному сервісі: використання IOT та BIG DATA. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії*: зб. тез та доповідей міжнародної конференції, м. Харків, 11-12 березня 2024 р. Харків: ФОП Бровін О.В., 2024. С. 264-266.
2. Грицук В. Ю., Пронін С. В. Перспективи впровадження прогностичного обслуговування транспортних засобів на основі машинного навчання. *Сучасний стан досліджень в сфері IT*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, м. Харків, 19 квітня 2024 р. Харків: ХНАДУ, 2024. С. 77-81.
3. Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В. П. Матейчик та ін. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Вип. 13. С. 126-138.
4. The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact / I. Kuric et al. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 244. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201824403003>.
5. Survey of smartphone-based sensing in vehicles for intelligent transportation system applications / Engelbrecht J., Booysen M. J., Bruwer F. J., van Rooyen G.-J. *IET Intelligent Transport Systems*. 2015. Vol. 9. № 10. Pp. 924-935. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2014.0248>.
6. Baek S. H., Jang J. W. Implementation of integrated OBD-II connector with external network. *Information Systems*. 2015. Vol. 50. Pp. 69-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.is.2014.06.011>.
7. Design and Implementation of a Wireless OBD II Fleet Management System / R. Malekian et al. *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 17. № 4. Pp. 1154-1164. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2631542>.

8. Türker G. F., Kutlu A. Survey of Smartphone applications based on OBD-II for Intelligent Transportation Systems. *International journal of engineering research and applications*. 2016. Vol. 6. Iss. 1. Pp. 69-73.
9. Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges / M. Marjani et al. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. Pp. 5247-5261. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2689040>.
10. Machine learning predictive model for Industry 4.0 / I.S. Candanedo et al. *Knowledge Management in Organizations : Proceedings of the 13th International Conference, Žilina, Slovakia, 6-10 August 2018*. Pp. 501-510. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95204-8_42.
11. Deep Learning in Industry 4.0 – Brief Overview / J. Hernavts et al. *Journal of Production Engineering*. 2018. Vol. 21. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.24867/JPE-2018-02-001>.
12. Kazi K. Reverse Engineering's Neural Network Approach to human brain. *Journal of Communication Engineering & Systems*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. Pp. 17-24. DOI: <https://doi.org/10.37591/joces.v12i2.951>.
13. Kazi K. Model for Agricultural Information system to improve crop yield using IoT. *Journal of Open Source Developments*. 2022. Vol. 9. Iss. 2. Pp. 16-24.
14. Announcement system in Bus / N. Salunke et al. *Journal of Image Processing and Intelligent Remote Sensing*. 2022. Vol. 2. Iss. 6. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.55529/jipirs.26.1.10>.
15. Sending notification to someone missing you through smart watch / D. Vishwanath Swami et al. *International Journal Of Information Technology & Computer Engineering (IJITC)*. 2022. Vol 2. Iss. 8. Pp. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.55529/ijitc.25.19.24>.
16. Reliability analysis for automobile engines: Conditional inference trees / S. Wang et al. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 72. Pp. 1392-1397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.065>.
17. Gayathri T. A Survey on Vehicle Health Monitoring and Prediction System. *International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCTST)*. 2017. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 191-193.
18. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів / В.П. Волков та ін. Харків : ФЛП Панов А.М., 2018. 299 с.
19. The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
20. Information Security Risk Management of Vehicles / D. Klets et al. *SAE Technical Paper*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>.
21. Пути улучшения современной системы диагностирования автомобилей / В.В. Аулин та ін. *Підвищення надійності машин і обладнання : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Кропивницький, 17-19 квіт. 2019 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С. 218-223*.
22. Павленко В. М., Кужель В. П., Хорін М. Є. Сутність автомобільної діагностики при впровадженні експертних систем. *Вісник машинобудування*. 2020. № 2(12). С. 85-92. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-12-2-85-92>.
23. Шокарев О. М., Болтянська Н. І. Засоби діагностики сучасних автотранспортних засобів. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : II Міжнародна науково-практична конференція, м. Кропивницький, 27 листопада 2020 р. ТДАУ ім. Д. Моторного. С. 450-454*.
24. Nalina V., Jayarekha P. Real Time Automated Vehicle Monitoring and Control System Using Internet of Vehicles. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 2018. Vol. 6. Pp. 491-494. DOI: <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i3.491494>.
25. Kusumaningrum D., Kurniati N., Santosa B. Machine Learning for Predictive Maintenance. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Sao Paulo, Brazil, 5-8 April 2021*. Pp. 2348-2356.
26. Vehicle Maintenance Data. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/chavindudulaj/vehicle-maintenance-data> (дата звернення 31.08.2024).
27. Multi-agent deep reinforcement learning-based maintenance optimization for multi-dependent component systems / P. Do et al. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 245. Article 123144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123144>.
28. Ali Y. H. Artificial Intelligence Application in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis. *Artificial Intelligence*. Ch. 14. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74932>.

29. Singh S. K., Singh A. K. A study: OBD III standard and its predecessors OBD I and OBD II. *Design Engineering*. 2021. Pp. 1-11.
30. Data Control in the Diagnostics and Forecasting the State of Complex Technical Systems / D. S. Shibaev et al. *Herald of advanced information technology*. 2019. Vol. 2. Iss. 3. Pp. 183-196. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.03.2019.2>.
31. Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport / V.V. Vyuzhuzhanin et al. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 776. Pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012049>.
32. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
33. Ghosh A. Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article 2602. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13102602>.
34. Higher Layer Protocols. URL: <https://kvaser.com/about-can/higher-layer-protocols/> (дата звернення 10.09.2024).
35. Items included in the J1939 Standards Collection. URL: <https://www.sae.org/standards/development/ground-vehicle/sae-j1939-standards-collection-on-the-web> (дата звернення 31.08.2024).
36. Vehicle Remote Health Monitoring and Prognostic Maintenance System / U. Shafi et al. *Journal of Advanced Transportation*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8061514>.
37. Impact of Driver Behaviour on Fuel Consumption: Classification, Evaluation and Prediction Using Machine Learning / P. Ping et al. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 78515-78532. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920489>.
38. Basak S., Sengupta S., Dubey A. Mechanisms for Integrated Feature Normalization and Remaining Useful Life Estimation Using LSTMs Applied to Hard-Disks. *2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, Washington, DC, USA, 12-15 June 2019. Pp. 208-216. DOI: <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2019.00055>.
39. In-Vehicle Communication Cyber Security: Challenges and Solutions / Rathore R. S., Hewage C., Kaiwartya O., Lloret J. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Article 6679. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22176679>.
40. Development of a sensor-based learning approach to prognostics in intelligent vehicle health monitoring / I. S. Cole et al. *PHM-2008 : Proceedings of the 2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, USA, 06-09 October 2008. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/PHM.2008.4711441>.
41. Predicting the need for vehicle compressor repairs using maintenance records and logged vehicle data / Prytz R., Nowaczyk S., Rognvaldsson T., Byttner S. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2015. Vol. 41. Pp. 139-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.02.009>.
42. Remote vehicle state of health monitoring and its application to vehicle no-start prediction / Y. Zhang et al. *AUTOTESTCON : Proceedings of the International Automatic Testing Conference*, Anaheim, CA, USA, 14-17 September 2009. Pp. 88-93. DOI: <https://doi.org/10.1109/AUTEST.2009.5314011>.
43. Naryal E., Kasliwal P. Real time vehicle health monitoring and driver information display system based on CAN and Android. *International Journal of Advance Foundation and Research in Computer*. 2014. Vol. 1. Iss. 11. Pp. 76-84.
44. A fuzzy diagnosis of multi-fault state based on information fusion from multiple sensors / H. Xue et al. *Journal of Vibroengineering*. 2016. Vol. 18. Iss. 4. Pp. 2135-2148. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16712>.
45. Dubois D., Prade H. Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty. Plenum Press, New York, USA, 1988. 280 p.
46. Data Mining Fruitful and Fun. URL: <https://orangedatamining.com/> (дата звернення 31.08.2024)
47. Automotive Vehicles Engine Health Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/parvmodi/automotive-vehicles-engine-health-dataset/data> (дата звернення 31.08.2024).
48. The Application of Random Forest to Predictive Maintenance / R. Kizito et al. *Proceedings of the 2018 IISE Annual Conference*, Orlando, Florida, USA, 19-22 May 2018. Pp. 354-359.

49. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012. Vol. 25(2). Pp. 1097-1105. DOI: <https://doi.org/10.1145/3065386>.
50. Ruder S., Park S.M., Sim K.B. An overview of gradient descent optimization algorithms. 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.04747>.
51. Reyad M., Sarhan A. M., Arafa M. A modified Adam algorithm for deep neural network optimization. *Neural Computing and Applications*. 2023. Vol. 35(23). Pp. 17095-17112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08568-z>.
52. Reddi S. J., Kale S., Kumar S. On the Convergence of Adam and beyond. *ICLR 2018 : the Sixth International Conference on Learning Representations, Vancouver, Canada, Mon Apr 30 April - 3 May 2018*. Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.09237>.
53. Chicco D., Jurman G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics*. 2020. Vol. 21. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>.

References:

1. V.Yu. Hritsuk, and Yu.V. Hritsuk, «Prohnostychnе obsluhovuvannia v avtomobilnomu servisi: vykorystannia IOT ta BIG DATA» [«Predictive maintenance in automotive service: using IOT and BIG DATA»], in Proc. Int. Conf. «Power plants and alternative energy sources», Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 264-266. (Ukr.)
2. V.Yu. Hrytsuk, and S.V. Pronin, «Perspektyvy vprovadzhennia prohnostychnoho obsluhovuvannia transportnykh zasobiv na osnovi mashynnoho navchannia» [«Prospects for the implementation of predictive vehicle maintenance based on machine learning»], in Proc. All-Ukrainian Conf. of higher education students and young scientists «Current state of research in the field of IT», Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 77-81. (Ukr.)
3. V.P. Mateichyk, V.P. Volkov, P.B. Komov, I.V. Gritsuk, A.P. Komov, and Ju.V. Volkov, «Osoblyvosti monitorynhu stanu transportnykh zasobiv z vykorystanniam bortovykh diahnostychnykh kompleksiv» [«Features of monitoring of vehicles state with using of board diagnostic complexes»], *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka – Project Management, Systems Analysis and Logistics*, vol. 13, pp. 126-138, 2014. (Ukr.)
4. I. Kuric, V. Mateichyk, M. Smieszek, M. Tsiuman, N. Goridko, and I. Gritsuk, «The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact», *MATEC Web of Conferences*, vol. 244, pp. 1-7, 2018. doi: **10.1051/mateconf/201824403003**.
5. J. Engelbrecht, M.J. Booysen, F.J. Bruwer, and G.-J. van Rooyen, «Survey of smartphone-based sensing in vehicles for intelligent transportation system applications», *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 9, № 10, pp. 924-935, 2015. doi: **10.1049/iet-its.2014.0248**.
6. S.H. Baek, and J.W. Jang, «Implementation of integrated OBD-II connector with external network», *Information Systems*, vol. 50, pp. 69-75, 2015. doi: **10.1016/j.is.2014.06.011**.
7. R. Malekian, N.R. Moloisane, L. Nair, B.T. Maharaj, and U.A.K. Chude-Okonkwo, «Design and Implementation of a Wireless OBD II Fleet Management System», *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, № 4, pp. 1154-1164, 2017. doi: **10.1109/JSEN.2016.2631542**.
8. G.F. Türker, and A. Kutlu, «Survey of Smartphone applications based on OBD-II for Intelligent Transportation Systems», *International journal of engineering research and applications*, vol. 6, iss. 1, pp. 69-73, 2016.
9. M. Marjani et al., «Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5247-5261, 2017. doi: **10.1109/ACCESS.2017.2689040**.
10. I. Sittón Candanedo, E. Hernández Nieves, S. Rodríguez González, M.T. Santos Martín, and A. González Briones, «Machine learning predictive model for Industry 4.0», in Proc. 13th International Conference «Knowledge Management in Organizations», Žilina, Slovakia, 2018, pp. 501-510. doi: **10.1007/978-3-319-95204-8_42**.
11. J. Hernavs, M. Ficko, L. Berus, R. Rudolf, and S. Klancnik, «Deep Learning in Industry 4.0 – Brief Overview», *Journal of Production Engineering*, vol. 21, pp. 1-5, 2018. doi: **10.24867/JPE-2018-02-001**.
12. K. Kazi, «Reverse Engineering's Neural Network Approach to human brain», *Journal of Communication Engineering & Systems*, vol. 12, iss. 2, pp. 17-24, 2022. doi: **10.37591/joces.v12i2.951**.

13. K. Kazi, «Model for Agricultural Information system to improve crop yield using IoT», *Journal of Open Source Developments*, vol. 9, iss. 2, pp. 16-24, 2022.
14. N. Salunke, S. Chavan, N. Karanje, S. Kalbhor, and K.S. Kazi, «Announcement system in Bus», *Journal of Image Processing and Intelligent Remote Sensing*, vol. 2, iss. 6, pp. 1-10, 2022. **doi: 10.55529/jipirs.26.1.10.**
15. D.V. Swami, S.S. Thamake, N.S. Ubale, P.V. Lokhande, and K.K.S. Liyakat, «Sending notification to someone missing you through smart watch», *International Journal of Information Technology & Computer Engineering (IJITC)*, vol 2, iss. 8, pp. 19-24, 2022. **doi: 10.55529/ijitc.25.19.24.**
16. S. Wang, Y. Liu, C. Di Cairano-Gilfedder, S. Titmus, M.M. Naim, and A.A. Syntetos, «Reliability analysis for automobile engines: Conditional inference trees», *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 1392-1397, 2018. **doi: 10.1016/j.procir.2018.03.065.**
17. T. Gayathri, «A Survey on Vehicle Health Monitoring and Prediction System», *International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCTST)*, vol. 5, iss. 3, pp. 191-193, 2017.
18. V.P. Volkov, I.V. Gritsuk, Yu.V. Hrytsuk, Yu.V. Volkov, and M.V. Volodarets, *Informatsiini systemy monitorynhu tekhnichnoho stanu avtomobiliv* [Information systems for monitoring the technical condition of vehicles]. Kharkiv, Ukraine: FLP Panov A.M. Publ., 2018. (Ukr.)
19. I. Gritsuk et al., «The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units», *SAE Technical Paper*. 2018. **doi: 10.4271/2018-01-1773.**
20. D. Klets et al., «Information Security Risk Management of Vehicles», *SAE Technical Paper*, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-0015.**
21. V.V. Aulyn, T.N. Zamota, A.V. Hrynkyv, A.A. Karaychev, and E.O. Kyrychenko, «Puty uluchsheniya sovremennoi systemi dyagnostyrovaniya avtomobylei» [«Ways to improve modern car diagnostics system»], in Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. «Increasing the reliability of machines and equipment», Kropyvnytskyi, 2019, pp. 218-223. (Rus.)
22. V. Pavlenko, V. Kuzhel, M. Khorin, «Sutnist avtomobilnoi diahnostryky pry vprovadzhenni ekspertnykh system» [«The essence of automobile diagnostics in the implementation of expert systems»], *Visnyk mashynobuduvannia – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, № 2(12), pp. 85-92, 2020. **doi: 10.31649/2413-4503-2020-12-2-85-92.**
23. O.M. Shokarev, and N.I. Boltianska, «Zasoby diahnostryky suchasnykh avtotransportnykh zasobiv» [«Diagnostic tools for modern vehicles»], in Proc. II Int. Sci.-Pract. Conf. «Technical support for innovative technologies in the agro-industrial complex», Kropyvnytskyi, 2020, pp. 450-454. (Ukr.)
24. V. Nalina, and P. Jayarekha, «Real Time Automated Vehicle Monitoring and Control System Using Internet of Vehicles», *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 6, pp. 491-494, 2018. **doi: 10.26438/ijcse/v6i3.491494.**
25. D. Kusumaningrum, N. Kurniati, and B. Santosa, «Machine Learning for Predictive Maintenance», in Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering and Operations Management, Sao Paulo, Brazil, 2021, pp. 2348-2356.
26. Vehicle Maintenance Data. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/chavindudulaj/vehicle-maintenance-data>. Accessed on: August 31, 2024.
27. P. Do, V.-T. Nguyen, A. Voisin, B. Iung, and W.A. Ferreira Neto, «Multi-agent deep reinforcement learning-based maintenance optimization for multi-dependent component systems», *Expert Systems with Applications*, vol. 245, article 123144, 2024. **doi: 10.1016/j.eswa.2024.123144.**
28. Y.H. Ali, «Artificial Intelligence Application in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis», in *Artificial Intelligence*, chapter 14, 2018. **doi: 10.5772/intechopen.74932.**
29. S.K. Singh, and A.K. Singh, «A study: OBD III standard and its predecessors OBD I and OBD II», *Design Engineering*, pp. 1-11, 2021.
30. D.S. Shibaev, V.V. Vyuzhuzhanin, N.D. Rudnichenko, N.O. Shibaeva, and T.V. Otradskaia, «Data Control in the Diagnostics and Forecasting the State of Complex Technical Systems», *Herald of advanced information technology*, vol. 2, iss. 3, pp. 183-196, 2019. **doi: 10.15276/haitech.03.2019.2.**
31. V.V. Vyuzhuzhanin et al., «Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport», *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 776, pp. 1-12, 2020. **doi: 10.1088/1757-899X/776/1/012049.**
32. V. Vychuzhanin et al., «Cognitive Model of the Internal Combustion Engine», *SAE Technical Paper*, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-1738.**

33. A. Ghosh, «Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review», *Energies*, vol. 13, article 2602, 2020. doi: **10.3390/en13102602**.
34. Higher Layer Protocols. [Online]. Available: <https://kvaser.com/about-can/higher-layer-protocols/>. Accessed on: September 10, 2024.
35. Items included in the J1939 Standards Collection. [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards/development/ground-vehicle/sae-j1939-standards-collection-on-the-web>. Accessed on: August 31, 2024.
36. U. Shafi, A. Safi, A.R. Shahid, S. Ziauddin, and M.Q. Saleem, «Vehicle Remote Health Monitoring and Prognostic Maintenance System», *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp. 1-10, 2018. doi: **10.1155/2018/8061514**.
37. P. Ping, W. Qin, Y. Xu, C. Miyajima, and K. Takeda, «Impact of Driver Behaviour on Fuel Consumption: Classification, Evaluation and Prediction Using Machine Learning», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78515-78532, 2019. doi: **10.1109/ACCESS.2019.2920489**.
38. S. Basak, S. Sengupta, and A. Dubey, «Mechanisms for Integrated Feature Normalization and Remaining Useful Life Estimation Using LSTMs Applied to Hard-Disks», in Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Computing (SMARTCOMP), Washington, DC, USA, 2019, pp. 208-216. doi: **10.1109/SMARTCOMP.2019.00055**.
39. R.S. Rathore, C. Hewage, O. Kaiwartya, and J. Lloret, «In-Vehicle Communication Cyber Security: Challenges and Solutions», *Sensors*, vol. 22, article 6679, 2022. doi: **10.3390/s22176679**.
40. I.S. Cole et al. «Development of a sensor-based learning approach to prognostics in intelligent vehicle health monitoring», in Proc. 2008 Int. Conf. on Prognostics and Health Management, Denver, USA, 2008, pp. 1-7. doi: **10.1109/PHM.2008.4711441**.
41. R. Prytz, S. Nowaczyk, T. Rognvaldsson, and S. Byttner, «Predicting the need for vehicle compressor repairs using maintenance records and logged vehicle data», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 41, pp. 139-150, 2015. doi: **10.1016/j.engappai.2015.02.009**.
42. Y. Zhang et al., «Remote vehicle state of health monitoring and its application to vehicle no-start prediction», in Proc. Int. Automatic Testing Conf. AUTOTESTCON, Anaheim, CA, USA, 2009, pp. 88-93. doi: **10.1109/AUTEST.2009.5314011**.
43. E. Naryal, and P. Kasliwal, «Real time vehicle health monitoring and driver information display system based on CAN and Android», *International Journal of Advance Foundation and Research in Computer*, vol. 1, iss. 11, pp. 76-84, 2014.
44. H. Xue, Z. Li, Y. Li, H. Jiang, and P. Chen, «A fuzzy diagnosis of multi-fault state based on information fusion from multiple sensors», *Journal of Vibroengineering*, vol. 18, iss. 4, pp. 2135-2148, 2016. doi: **10.21595/jve.2016.16712**.
45. D. Dubois, and H. Prade, *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York, USA: Plenum Press Publ., 1988.
46. Data Mining Fruitful and Fun. [Online]. Available: <https://orangedatamining.com/>. Accessed on: August 31, 2024.
47. Automotive Vehicles Engine Health Dataset. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/parvmodi/automotive-vehicles-engine-health-dataset/data>. Accessed on: August 31, 2024.
48. R. Kizito, P. Scruggs, X. Li, R. Kress, M. Devinney, and T. Berg, «The Application of Random Forest to Predictive Maintenance», in Proc. 2018 IISE Annual Conference, Orlando, Florida, USA, 2018, pp. 354-359.
49. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G.E. Hinton, «ImageNet classification with deep convolutional neural networks», *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 25(2), pp. 1097-1105, 2012. doi: **10.1145/3065386**.
50. S. Ruder, S.M. Park, and K.B. Sim, «An overview of gradient descent optimization algorithms», 2017. doi: **10.48550/arXiv.1609.04747**.
51. M. Reyad, A.M. Sarhan, and M. Arafa, «A modified Adam algorithm for deep neural network optimization», *Neural Computing and Applications*, vol. 35(23), pp. 17095-17112, 2023. doi: **10.1007/s00521-023-08568-z**.
52. S.J. Reddi, S. Kale, and S. Kumar, «On the Convergence of Adam and beyond», in Proc. 6-th Int. Conf. on Learning Representations ICLR 2018, Vancouver, Canada, 2018, pp. 1-23. doi: **10.48550/arXiv.1904.09237**.

53. D. Chicco, and G. Jurman, «The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation», *BMC Genomics*, vol. 21, article 6, 2020. doi: 10.1186/s12864-019-6413-7.

Стаття надійшла 05.10.2024

Стаття прийнята 26.10.2024

УДК 004.94:378.091

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321210

© Мальцева О.В.¹, Кривенко О.В.²

МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ЩОДО СУПРОВОДУ ВСТУПНОЇ КАМΠΑНІЇ У ДВНЗ «ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

У статті розглянуто застосування структурно-функціонального моделювання в освітній сфері з метою оптимізації основних бізнес-процесів. Враховуючи тенденцію на зменшення кількості вступників до ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», що намітилася за підсумками вступної кампанії 2024 року, проведено докладний аналіз чинної моделі керування внутрішньою системою забезпечення якості освіти. Виявлено місце вступної кампанії у цій системі, проаналізовано взаємодію з іншими бізнес-процесами задля переосмислення цього досвіду та пошуку нової бізнес-моделі набору студентів на навчання. Розроблено структурно-функціональну модель бізнес-процесу вступної кампанії у ДВНЗ «ПДТУ» «AS-IS» («ЯК Є») з позицій приймальної комісії та з огляду на її подальший аналіз та впровадження заходів реінжинірингу. Для побудови моделі бізнес-процесу вступної кампанії було залучено методологію SADT, а саме: стандарт функціонального моделювання і опису бізнес-процесів – IDEF0. Проєктування в нотації IDEF0 контекстної моделі «Набір студентів (вступна кампанія)» відбило загальну картину бізнес-процесу, визначило його зовнішні та внутрішні зв'язки, способи взаємодії з підсистемами та функціями, що супроводжують кожен етап вступної кампанії. У результаті виокремлення компонентів моделі першої декомпозиції проведено ідентифікацію та опис підпроцесів бізнес-процесу «Набір студентів (вступна кампанія)». Графічно представлено функціональні блоки, що відображають життєві цикли процесу вступної кампанії («Планування вступної кампанії»; «Організація вступної кампанії»; «Виконання вступної кампанії»; «Контроль і корекція вступної кампанії»), охарактеризовано кожний із них. На другому рівні декомпозиції розбудовано дерево вузлів бізнес-процесів та визначено субпроцеси, що є складниками підпроцесів. Створена модель «AS-IS» («ЯК Є») базується на реальному стані справ та передбачає її подальшу оптимізацію, тобто побудову моделі «TO-BE» («ЯК БУДЕ»).

Ключові слова: структурно-функціональне моделювання, нотація IDEF0, моделювання бізнес-процесів в освітній сфері, бізнес-процеси щодо супроводу вступної кампанії, приймальна комісія, заклад вищої освіти, ДВНЗ «ПДТУ».

O.V. Maltseva, O.V. Kryvenko. Modeling of business processes to support the admission campaign at the SHEI «Priazovsky State Technical University». The article considers the application of structural and functional modeling in the educational sphere in order to optimize the main business processes. Given the trend towards a decrease in the number

¹ магістрантка, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1497-4098, maltseva_o_v@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-2860-6575, krivenko_o_v@pstu.edu

of applicants to the SHEI «Priazovsky State Technical University», which emerged following the results of the 2024 admission campaign, a detailed analysis of the current model of managing the internal system of ensuring the quality of education is carried out. The place of the admission campaign in this system is identified, and the interaction with other business processes is analyzed in order to rethink this experience and find a new business model for recruiting students for study. A structural and functional model of the business process of the admission campaign at PSTU «AS-IS» has been developed from the perspective of the admission committee and with a view to its further analysis and implementation of reengineering measures. The SADT methodology was used to build a business process model of the admission campaign, namely, the standard for functional modeling and description of business processes - IDEF0. Designing the contextual model «Recruitment of students (admission campaign)» in IDEF0 notation reflected the overall picture of the business process, defined its external and internal connections, ways of interaction with subsystems and functions that accompany each stage of the admission campaign. As a result of the separation of the components of the model of the first decomposition, the identification and description of the subprocesses of the business process «Recruitment of students (admission campaign)» was carried out. The functional blocks that reflect the life cycles of the admission process («Planning of the admission campaign»; «Organization of the admission campaign»; «Execution of the admission campaign»; «Control and correction of the admission campaign») are graphically presented, and each of them is characterized. At the second level of decomposition, a tree of business process nodes is built and subprocesses that are components of subprocesses are identified. The created «AS-IS» model is based on the real state of affairs and provides for its further optimization, i.e., the construction of the «TO-BE» model.

Keywords: structural-functional modeling, IDEF0 notation, modeling of business processes in the educational sphere, business processes for supporting the admission campaign, admission committee, higher education institution, SHEI «PSTU».

Постановка проблеми. В умовах воєнного часу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ») був вимушений переїхати із м. Маріуполь до м. Дніпро, поповнивши перелік вишів-переселенців в Україні. За цей період було напрацьовано алгоритми адаптації таких вишів до інших умов існування. Однак характер проблем, із якими сьогодні стикаються заклади вищої освіти (ЗВО), що опинилися у новому місці дислокації, постійно змінюється під впливом різноманітних соціально-економічних та політичних чинників. Одним із проблемних аспектів діяльності університету у змінених обставинах є організація та проведення вступної кампанії в ситуації відриву від традиційних баз рекрутування абітурієнтів, частково або цілком порушених зв'язків із стейкхолдерами, переходу до дистанційного формату роботи.

Вступні кампанії, проведені ДВНЗ «ПДТУ» за воєнних років (2022-2024), показали, що, з одного боку, навіть у надскладних обставинах було забезпечено необхідні показники набору студентів за освітніми рівнями бакалавр, магістр на денну та заочну форми навчання. З іншого боку, успішні показники були досягнуті не всіма підрозділами. За підсумками останньої вступної кампанії кількість вступників до ДВНЗ «ПДТУ» зменшилася. Тож аналіз чинної моделі керування внутрішньою системою забезпечення якості освіти (ВСЗЯО), виявлення місця вступної кампанії як бізнес-процесу у цій системі, аналіз способів її супроводу іншими бізнес-процесами, переосмислення досвіду та пошук нової бізнес-моделі вступної кампанії ДВНЗ «ПДТУ» є надзвичайно актуальними завданнями для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності на ринку освітніх послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками спостерігається поживлення інтересу науковців до бізнес-аналізу освітньої діяльності, моделювання бізнес-процесів у ЗВО (С. Андрусенко, В. Завгородній, Д. Лук'яненко, Т. Січко, О. Степаненко, Г. Хімічева, Г. Шліхта, Є. Ячменьов та ін.). Вступна кампанія як один із основних бізнес-процесів у ВСЗЯО ЗВО також стає предметом вивчення з метою удосконалення, приміром: упровадження автоматизованих компонент управління роботою приймальною комісією; застосування нейронних мереж і використання кореляційно-регресійного аналізу та трендових моделей для прогнозування майбутніх кількісних показників вступної кампанії (Д. Букреев, П. Жежнич, Д. Каричковський,

В. Круглик, В. Осадчий, К. Осадча, К. Сердюк, А. Шілінг та ін.). Окремо варто виділити авторів, чий дослідження присвячені суто моделюванню бізнес-процесу вступної кампанії, – В. Нетепчук [1], С. Андрусенко, О. Бугайчук [2, 3], В. Макоєдова [4], М. Коломієць, Р. Мирний [5]. Незважаючи на наявність значної кількості публікацій, що висвітлюють моделювання бізнес-процесів вступної кампанії у вишах, проблематика залишається запитаною, оскільки кожний ЗВО є унікальною системою бізнес-процесів і потребує адаптації наявних підходів до бізнес-моделювання з урахуванням їхньої специфіки.

Метою статті є розробка структурно-функціональної моделі бізнес-процесу вступної кампанії у ДВНЗ «ПДТУ» «AS-IS» («ЯК Є») з позицій приймальної комісії та з огляду на її подальший аналіз та впровадження заходів реінжинірингу.

Основні завдання роботи включають: проєктування в нотації IDEF0 контекстної моделі бізнес-процесу «Набір студентів (вступна кампанія)»; виокремлення компонентів моделі першої декомпозиції, ідентифікацію та опис підпроцесів бізнес-процесу «Набір студентів (вступна кампанія)»; розбудову на другому рівні декомпозиції дерева вузлів бізнес-процесів, задіяних у супровід вступної кампанії у ДВНЗ «ПДТУ», та визначення субпроцесів, що є складниками підпроцесів.

Виклад основного матеріалу. Проєктуванню моделі вступної кампанії «AS-IS» («ЯК Є») передуює вибір методологічного та програмного інструментів моделювання. Перший заснований на використанні певної методики моделювання та опису процесів. Другий – передбачає застосування програмного продукту, який підтримує нотацію моделювання, що пропонує використовувати обрана методологія.

Для побудови моделей бізнес-процесів найчастіше залучають методології структурного і об'єктно-орієнтованого аналізу. Структурний аналіз як метод дослідження системи починається з її загального огляду з подальшою декомпозицією, набуваючи ієрархічної структури з послідовним рівнем деталізації. SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) є одною з найпоширеніших методологій такого типу. Загальне визнання корисності SADT призвело до стандартизації та публікації її частини, призначеної для функціонального моделювання. У результаті з'явилась методологія і стандарт функціонального моделювання і опису бізнес-процесів – IDEF0 (*Integration Definition for Function Modeling*). Засоби IDEF0 є часто застосовуваним інструментом для моделювання бізнес-процесів в освітній сфері. Зазвичай це відбувається на першому етапі вивчення системи, яку візуалізують у вигляді набору взаємопов'язаних функціональних блоків, що дозволяє зробити опис процесів більш наочними. Тож застосуємо методологію IDEF0 для опису основних бізнес-процесів вступної кампанії на верхньому рівні. Це забезпечить повноту опису моделі. Створена модель «AS-IS» («ЯК Є») базуватиметься на реальному стані справ та передбачатиме її подальшу оптимізацію, що у термінах IDEF0 полягає у побудові моделі «TO-BE» («ЯК БУДЕ»).

Контекстна діаграма є основою у розробці моделі бізнес-процесу «Набір студентів (вступна кампанія)» та відбиває загальну картину процесу, визначає його зовнішні та внутрішні зв'язки (Рис. 1). Вступна кампанія належить до основних бізнес-процесів ДВНЗ «ПДТУ» та включає всі операції, пов'язані з управлінням процесом вступу – від етапу планування до зарахування абітурієнтів. Абітурієнти – основні споживачі бізнес-процесу. Вони взаємодіють із процесом на всіх етапах його життєвого циклу: під час отримання інформації про вступ, подання заявки, відстеження статусу своїх заявок тощо. Зовнішні системи (Міністерство освіти і науки України, електронний кабінет вступника) забезпечують нормативні вимоги, дані про абітурієнтів, контроль процесу вступу. Педагогічний склад (викладачі, куратори програм) залучений до процесу оцінки кандидатів на навчання за певними програмами, проведення вступних випробувань (де передбачено умовами вступу), консультацій для абітурієнтів. Адміністрація відповідає за контроль та загальне управління вступною кампанією, затвердження результатів, зарахування на програми. Власником вступної кампанії як бізнес-процесу є приймальна комісія.



Рис. 1 – Контекстна діаграма «Набір студентів (вступна кампанія)»

У Таблиці 1 наведена характеристика даних контекстної діаграми «Набір студентів (вступна кампанія)».

Таблиця 1

Характеристика даних контекстної діаграми «Набір студентів (вступна кампанія)»	
Назва / Тип	Характеристика
1	2
Ліцензії на освітню діяльність / Входи (Input)	Ліцензії підтверджують право ЗВО здійснювати освітню діяльність за певними спеціальностями. Вони визначають максимальну кількість студентів, яку ЗВО має право прийняти. Наявність ліцензій є обов'язковою умовою для проведення вступної кампанії та підтверджує законність діяльності ЗВО.
Результати ЗНО (в умовах воєнного стану НМТ – Національного мультипредметного тесту) / Входи (Input)	Зовнішнє незалежне оцінювання (ЗНО)/НТМ є основним критерієм оцінки знань абітурієнтів. Результати ЗНО/НТМ використовуються для ранжування абітурієнтів і визначення тих, хто може бути зарахований на навчання. Це дозволяє об'єктивно оцінити академічний рівень абітурієнтів.
Абітурієнти / Входи (Input)	Абітурієнти подають заявки на вступ до ЗВО, проходять вступні іспити та подають необхідні документи. Вони є основними учасниками вступної кампанії і їх активність впливає на успішність процесу. Інформація про абітурієнтів використовується для формування списків кандидатів на зарахування.
Вступники / Виходи (Output)	Абітурієнти, які успішно пройшли відбір і були зараховані на навчання. Вони отримують офіційні повідомлення про зарахування та стають студентами ЗВО. Результат є головним показником успішності вступної кампанії.
Відмова вступникам / Виходи (Output)	Відмови надаються абітурієнтам, які не відповідали критеріям відбору або не набрали достатньої кількості балів. Офіційні документи з відмовою містять інформацію про причини відмови. Дозволяє абітурієнтам зрозуміти, чому їх не було зараховано, і що можна покращити в майбутньому.
Статистичні звіти / Виходи (Output)	Статистичні звіти містять дані про кількість поданих заявок, результати вступних іспитів, кількість зарахованих студентів і інші показники. Звіти використовуються для аналізу ефективності вступної кампанії і планування майбутніх кампаній. Вони дозволяють зрозуміти тенденції та прийняти обґрунтовані управлінські рішення.

Продовження таблиці 1

1	2
Контракти / Виходи (Output)	Контракти укладаються з абітурієнтами, які були зараховані на контрактну форму навчання. Вони визначають умови навчання, права і обов'язки сторін. Контракти є юридично обов'язковими документами, які закріплюють відносини між студентом і ЗВО.
Накази про зарахування / Виходи (Output)	Накази на зарахування є офіційними документами, які підтверджують зарахування абітурієнтів до ЗВО. Вони підписуються керівництвом ЗВО і є підставою для внесення студентів до офіційних списків. Накази мають юридичну силу і є кінцевим результатом вступної кампанії.
Законодавство України в сфері освіти / Керування (Control)	Законодавчі акти, які регулюють процес вступу до ЗВО. Вони визначають основні правила, вимоги та процедури, яких необхідно дотримуватися під час вступної кампанії. Забезпечення дотримання актів гарантує, що процес вступу відповідає юридичним стандартам – Закони України «Про освіту», «Про вищу освіту», накази МОН, ліцензійні умови, стандарти якості освіти.
Міністерство освіти та науки України / Керування (Control)	Міністерство встановлює загальні правила та вимоги до вступної кампанії, видає нормативні акти і контролює їх виконання. Воно регулює діяльність ЗВО та забезпечує дотримання законодавства. Міністерство також здійснює нагляд за якістю освіти.
Центр оцінювання якості освіти / Керування (Control)	Центр відповідає за проведення ЗНО/НМТ та забезпечення об'єктивності оцінювання знань абітурієнтів. Він розробляє іспитові матеріали, проводить тестування і аналізує результати. Центр гарантує надійність і чесність процесу оцінювання.
Приймальна комісія / Керування (Control)	Приймальна комісія організовує та координує всі етапи вступної кампанії. Вона відповідає за прийом заявок, проведення іспитів, складання списків кандидатів і прийняття рішень про зарахування. Комісія забезпечує прозорість і справедливість процесу вступу.
Фінансовий відділ / Керування (Control)	Фінансовий відділ управляє бюджетними коштами, виділеними на проведення вступної кампанії. Він відповідає за фінансування рекламних кампаній, оплату роботи персоналу та інші витрати. Відділ контролює фінансові аспекти вступної кампанії і забезпечує ефективне використання ресурсів.
Маркетинговий відділ / Керування (Control)	Маркетинговий відділ займається просуванням освітніх програм ЗВО і залученням абітурієнтів. Він розробляє маркетингові стратегії, проводить рекламні кампанії і аналізує їх ефективність. Відділ відповідає за формування позитивного іміджу ЗВО і привернення уваги потенційних студентів.
Інформаційні системи / Механізми (Mechanism)	Інформаційні системи забезпечують автоматизацію процесів обробки заявок, зберігання даних і моніторингу процесу вступу. Вони допомагають знизити помилки, підвищити ефективність і забезпечити зручність для абітурієнтів. Використання таких систем дозволяє оперативно управляти великою кількістю даних.
Інформаційні технології / Механізми (Mechanism)	Інформаційні технології використовуються для автоматизації і оптимізації процесів вступної кампанії. Вони включають програмне забезпечення для обробки заявок, управління даними і комунікації з абітурієнтами. Використання ІТ підвищує оперативність і точність виконання завдань.
Нормативно-правові акти / Механізми (Mechanism)	Нормативно-правові акти регулюють порядок і умови проведення вступної кампанії. Вони включають закони, постанови, накази і інші документи, які визначають правила прийому до ЗВО. Дотримання актів забезпечує відповідність процесу вступу чинному законодавству.
Фінансові ресурси / Механізми (Mechanism)	Фінансові ресурси забезпечують фінансування всіх етапів вступної кампанії. Вони використовуються для оплати роботи персоналу, проведення рекламних кампаній, обробки заявок і ін. Ефективне управління фінансами є ключовим для успішного проведення вступної кампанії.

Продовження таблиці 1

1	2
Персонал / Механізми (Mechanism)	Персонал включає викладачів, адміністративних працівників, членів приймальної комісії та інших фахівців, залучених до вступної кампанії. Висококваліфікований персонал забезпечує якісне виконання всіх завдань і підтримку абітурієнтів на всіх етапах процесу.
Матеріально-технічна база / Механізми (Mechanism)	Матеріально-технічна база включає приміщення, обладнання, техніку і інші ресурси, необхідні для проведення вступної кампанії. Вона забезпечує комфортні умови для роботи персоналу і абітурієнтів. Від якості матеріально-технічної бази залежить ефективність і успішність процесу вступу.

Бізнес-процес вступної кампанії «Набір студентів (вступна кампанія)» (A0) розкладемо на функціональні блоки, що відбивають життєві цикли процесу вступної кампанії: «Планування вступної кампанії» (A1); «Організація вступної кампанії» (A2), «Виконання вступної кампанії» (A3), «Контроль і корекція вступної кампанії» (A4) (Рис. 2).

Основні компоненти (функціональні блоки) діаграми охарактеризовані у Таблиці 2, а елементи, які впливають на набір студентів під час вступної кампанії (Входи (*Input*), Виходи (*OutPut*), Керування (*Control*) та Механізми (*Mechanism*)), їх назви та властивості – у Таблиці 3.

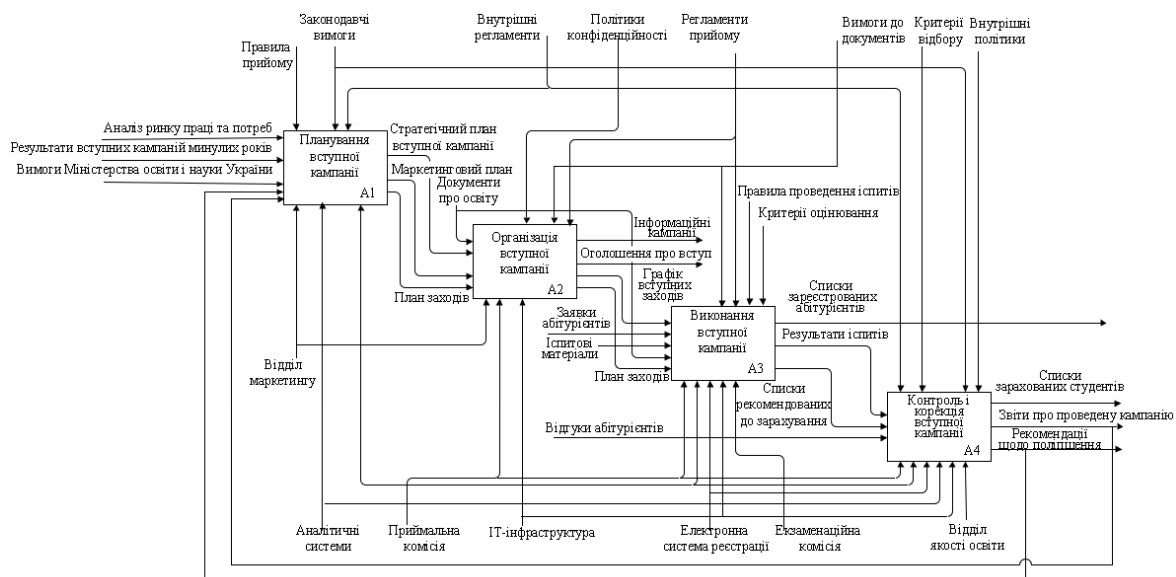


Рис. 2 – Функціональна діаграма «Набір студентів (вступна кампанія)»

Виокремлені та охарактеризовані компоненти забезпечують комплексний підхід до проведення вступної кампанії, охоплюючи всі необхідні етапи від планування до завершення та аналізу результатів.

Таблиця 2

Компоненти діаграми декомпозиції «Набір студентів (вступна кампанія)»

Назва	Характеристика
Планування вступної кампанії	Початковий і визначальний етап, який включає збір даних щодо актуальних спеціальностей, аналіз попередніх кампаній та визначення цільової аудиторії. На етапі розробляються конкурсні програми, формують унікальні торгові пропозиції (УТП) (ціна контракту), розробляють освітні програми та створюють стратегію просування супутніх освітніх продуктів (курси для абітурієнтів). Також проводять розробку правил вступу відповідно до поточних умов вступу до ЗВО, запропонованих МОН; формують бюджет і створюють рекламні матеріали, спрямовують їх до веб-сайту університету для інформування абітурієнтів.

Продовження таблиці 2

Назва	Характеристика
Організація вступної кампанії	Етап включає всі дії, що необхідні для підготовки та проведення вступної кампанії, а саме: формування робочої групи, розподіл ролей, розробку детального плану дій і підготовку необхідних матеріалів. Також відбувається налаштування інформаційної системи для обробки заяв, автоматизація реєстрації абітурієнтів, залучення бюджетних коштів та спонсорів; здійснюють розподіл бюджету для забезпечення ефективного проведення кампанії.
Виконання вступної кампанії	Етап проведення вступної кампанії зосереджується на реалізації запланованих заходів, моніторингу рекламних кампаній та взаємодії з абітурієнтами. Включає прийом документів, перевірку їх відповідності вимогам, надання консультацій, дистанційну підтримку комунікації, організацію та проведення співбесід, іспитів та конкурсів (які передбачені за правилами вступу) для відбору кандидатів. Здійснюється складання списків за результатами, ранжування кандидатів, прийняття рішень про зарахування, інформування абітурієнтів про результати, оформлення необхідних документів та контрактів.
Контроль і корекція вступної кампанії	Заходи контролю та корекції, які здійснюються для забезпечення якості та ефективності процесу вступу. На етапі збирають та аналізують дані про проведення кампанії, виявляють відхилення та їх причини, розробляють коригувальні заходи. Також готують звіт про проведену кампанію, архівують матеріали, проводять бенчмаркінг для порівняння результатів вступу з іншими закладами освіти, та вносяться зміни до бізнес-процесів для оптимізації наступних кампаній.

Таблиця 3

Характеристика даних до функціональної діаграми «Набір студентів (вступна кампанія)»

Назва	Характеристика	Тип / Складники
1	2	3
Аналіз ринку праці та потреб	Дані про попит на певні спеціальності, вимоги роботодавців, які допомагають визначити актуальні напрямки навчання. Інформація дозволяє адаптувати освітні програми до ринкових потреб і запитів стейкхолдерів	Вхід (Input) / Планування вступної кампанії
Результати вступних кампаній минулих років	Аналітичні дані про кількість заяв, конкурс, успішність минулих кампаній. Використовуються для аналізу та покращення планування поточної і майбутніх кампаній.	Вхід (Input) / Планування вступної кампанії
Вимоги Міністерства освіти і науки України	Законодавчі акти, нормативи та рекомендації Міністерства, що встановлюють загальні правила прийому та вимоги до абітурієнтів. Дотримання цих вимог є обов'язковим.	Вхід (Input) / Планування вступної кампанії
Стратегічний план вступної кампанії	Документ, який визначає основні цілі, завдання та терміни проведення вступної кампанії. Використовується для координації дій усіх учасників процесу.	Вихід (Output) / Планування вступної кампанії Вхід (Input) / Організація вступної кампанії
Маркетинговий план	План рекламних кампаній та заходів для залучення абітурієнтів. Включає розробку стратегії просування освітніх програм.	Вихід (Output) / Планування вступної кампанії Вхід (Input) / Організація вступної кампанії
План заходів	Деталізований графік проведення вступних іспитів, днів відкритих дверей, консультацій. Використовується для ефективного планування та організації вступної кампанії.	Вихід (Output) / Планування вступної кампанії, Організація вступної кампанії Вхід (Input) / Організація вступної кампанії

Продовження таблиці 3

1	2	3
Правила при-йому	Вимоги до абітурієнтів, перелік необхідних документів. Визначаються правилами та регламентами університету.	Керування (Control) / Планування вступної кампанії
Законодавчі ви-моги	Державні стандарти, нормативні акти, які регулюють процес вступу до ЗВО. Забезпечують відповідність законодавству.	Керування (Control) / Планування вступної кампанії Керування (Control) / Контроль і корекція
Внутрішні регла-менти	Внутрішні нормативні документи універси-тету, які регламентують проведення вступ-ної кампанії.	Керування (Control) / Планування вступної кампанії Керування (Control) / Контроль і корекція
Відділ маркетин-гу	Підготовка рекламних матеріалів, організа-ція заходів для просування освітніх програм.	Механізм (Mechanism) / Планування вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Організація вступної кампанії
Приймальна ко-місія	Керування процесом прийому документів, взаємодія з абітурієнтами, проведення всту-пних іспитів.	Механізм (Mechanism) / Планування вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Організація вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Виконання вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Контроль і корекція
Аналітичні сис-теми	Програмні комплекси для аналізу даних та планування вступної кампанії.	Механізм (Mechanism) / Планування вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Контроль і корекція
Стратегічний план	Документ, що окреслює основні цілі і завдання кампанії, направляє діяльність усіх учасників процесу.	Вхід (Input) / Організація вступної кампанії
Маркетинговий план	Конкретні заходи для залучення абітурієн-тів, рекламні кампанії, заходи для підви-щення інформованості.	Вхід (Input) / Організація вступної кампанії
Документи про освіту	Атестати, сертифікати, дипломи, необхідні для підтвердження кваліфікації абітурієнтів.	Вхід (Input) / Організація вступної кампанії Вхід (Input) / Виконання вступної кампанії
Оголошення про вступ	Розміщення інформації про вступну кампа-нію на сайті університету, в соцмережах, ЗМІ.	Вихід (Output) / Організація вступної кампанії
Інформаційні ка-мпанії	Проведення презентацій, вебінарів, днів від-критих дверей для залучення абітурієнтів.	Вихід (Output) / Організація вступної кампанії
Графік вступних заходів	Розклад іспитів, консультацій, реєстрацій, який використовується для координації дій.	Вихід (Output) / Організація вступної кампанії Вхід (Input) / Виконання вступної кампанії
Політики конфі-денційності	Захист персональних даних абітурієнтів, до-тримання конфіденційності інформації.	Керування (Control) / Організація вступної кампанії
Вимоги до доку-ментів	Перелік необхідних документів для подачі, вимоги до їх оформлення.	Керування (Control) / Організація вступної кампанії Керування (Control) / Виконання вступної кампанії

Продовження таблиці 3

1	2	3
Регламенти прийому	Внутрішні правила і процедури прийому документів, регулюють процес прийому.	Вхід (Input) / Організація вступної кампанії Вхід (Input) / Виконання вступної кампанії
ІТ-інфраструктура	Електронні системи реєстрації, бази даних, програмне забезпечення для обробки інформації.	Механізм (Mechanism) / Організація вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Виконання вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Контроль і корекція
Заявки абітурієнтів	Подані документи, заповнені форми заявок, необхідні для участі у вступній кампанії.	Вхід (Input) / Виконання вступної кампанії
Іспитові матеріали	Завдання, тести, білети для проведення вступних іспитів.	Вхід (Input) / Виконання вступної кампанії
Списки зареєстрованих абітурієнтів	Дані про абітурієнтів, які подали документи і пройшли реєстрацію.	Вихід (Output) / Виконання вступної кампанії
Результати іспитів	Оцінки, результати тестувань, які використовуються для оцінки успішності абітурієнтів.	Вихід (Output) / Виконання вступної кампанії Вхід (Input) / Контроль і корекція
Списки рекомендованих до зарахування	Рейтинг успішності абітурієнтів, які рекомендовані для зарахування.	Вихід (Output) / Виконання вступної кампанії Вихід (Output) / Вхід (Input) / Контроль і корекція
Правила проведення іспитів	Вимоги до іспитів, процедури їх проведення, забезпечення чесності та прозорості.	Керування (Control) / Виконання вступної кампанії
Критерії оцінювання	Методики оцінювання результатів іспитів, визначають підходи до оцінки знань.	Керування (Control) / Виконання вступної кампанії
Приймальна комісія	Організація і проведення вступних іспитів, прийом документів, взаємодія з абітурієнтами.	Механізм (Mechanism) / Виконання вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Контроль і корекція
Електронна система реєстрації	Обробка заявок, зберігання даних абітурієнтів, автоматизація процесів вступної кампанії. Системи забезпечують оперативність і точність обробки інформації, дозволяють абітурієнтам подавати заявки онлайн. Використовується для ефективного управління даними.	Механізм (Mechanism) / Виконання вступної кампанії Механізм (Mechanism) / Контроль і корекція
Екзаменаційна комісія	Проведення вступних іспитів, оцінка результатів, забезпечення об'єктивності та чесності іспитів. Комісія складається з викладачів та інших кваліфікованих осіб, які відповідають за проведення тестування.	Механізм (Mechanism) / Виконання вступної кампанії
Результати іспитів	Дані про оцінки абітурієнтів, які використовуються для формування списків рекомендованих до зарахування. Звіти про результати іспитів дозволяють оцінити рівень знань абітурієнтів.	Вхід (Input) / Контроль і корекція

Продовження таблиці 3

1	2	3
Списки рекомендованих до зарахування	Рейтинги успішності, що визначають абітурієнтів, які можуть бути зараховані на навчання. Списки формуються на основі результатів іспитів та інших критеріїв відбору.	Вхід (Input) / Контроль і корекція
Відгуки абітурієнтів	Зворотній зв'язок від учасників вступної кампанії щодо процесу подачі документів, організації іспитів, отримання інформації. Відгуки використовуються для покращення процесів та усунення недоліків.	Вхід (Input) / Контроль і корекція
Списки зарахованих студентів	Офіційні документи про зарахування абітурієнтів, які успішно пройшли всі етапи відбору. Накази на зарахування підтверджують статус абітурієнта як студента.	Вихід (Output) / Контроль і корекція
Звіти про проведену кампанію	Аналітичні дані про хід та результати вступної кампанії, включаючи статистичні дані, відгуки абітурієнтів, показники ефективності. Використовуються для аналізу та планування майбутніх кампаній.	Вихід (Output) / Контроль і корекція
		Вхід (Input) / Планування вступної кампанії
Рекомендації щодо поліпшення	Пропозиції щодо оптимізації процесів вступної кампанії на основі аналізу поточних результатів. Рекомендації допомагають вносити зміни до плану та підходів для підвищення ефективності майбутніх кампаній.	Вихід (Output) / Контроль і корекція
		Вхід (Input) / Планування вступної кампанії
Критерії відбору	Вимоги до зарахування, методики відбору абітурієнтів, які встановлюють стандарти оцінювання та критерії успішності. Забезпечують об'єктивність і прозорість процесу відбору.	Керування (Control) / Контроль і корекція
Внутрішні політики	Правила та процедури університету, що регулюють внутрішні аспекти проведення вступної кампанії. Включають вимоги до організації роботи персоналу, виконання процедур та документування процесів.	Керування (Control) / Контроль і корекція
Відділ освіти	Оцінка ефективності процесів, впровадження покращень на основі аналізу даних та відгуків. Відділ відповідає за контроль дотримання стандартів якості та надання рекомендацій щодо удосконалення процесів.	Механізм (Mechanism) / Контроль і корекція

Зміст Таблиці 3 допомагає встановити взаємозв'язки між функціональними блоками діаграми, що важливо для аналізу бізнес-процесів, які супроводжують вступну кампанію. Розглянуті елементи діаграми першої декомпозиції дають підстави для подальших деталізацій. У цілому запропонована модель бізнес-процесів, що супроводжують вступну кампанію, складається із 41 підпроцесу другого рівня декомпозиції.

У нотації IDEF0 можна графічно візуалізувати модель дерева вузлів супроводу вступної кампанії у ДВНЗ «ПДТУ» (Рис. 3).

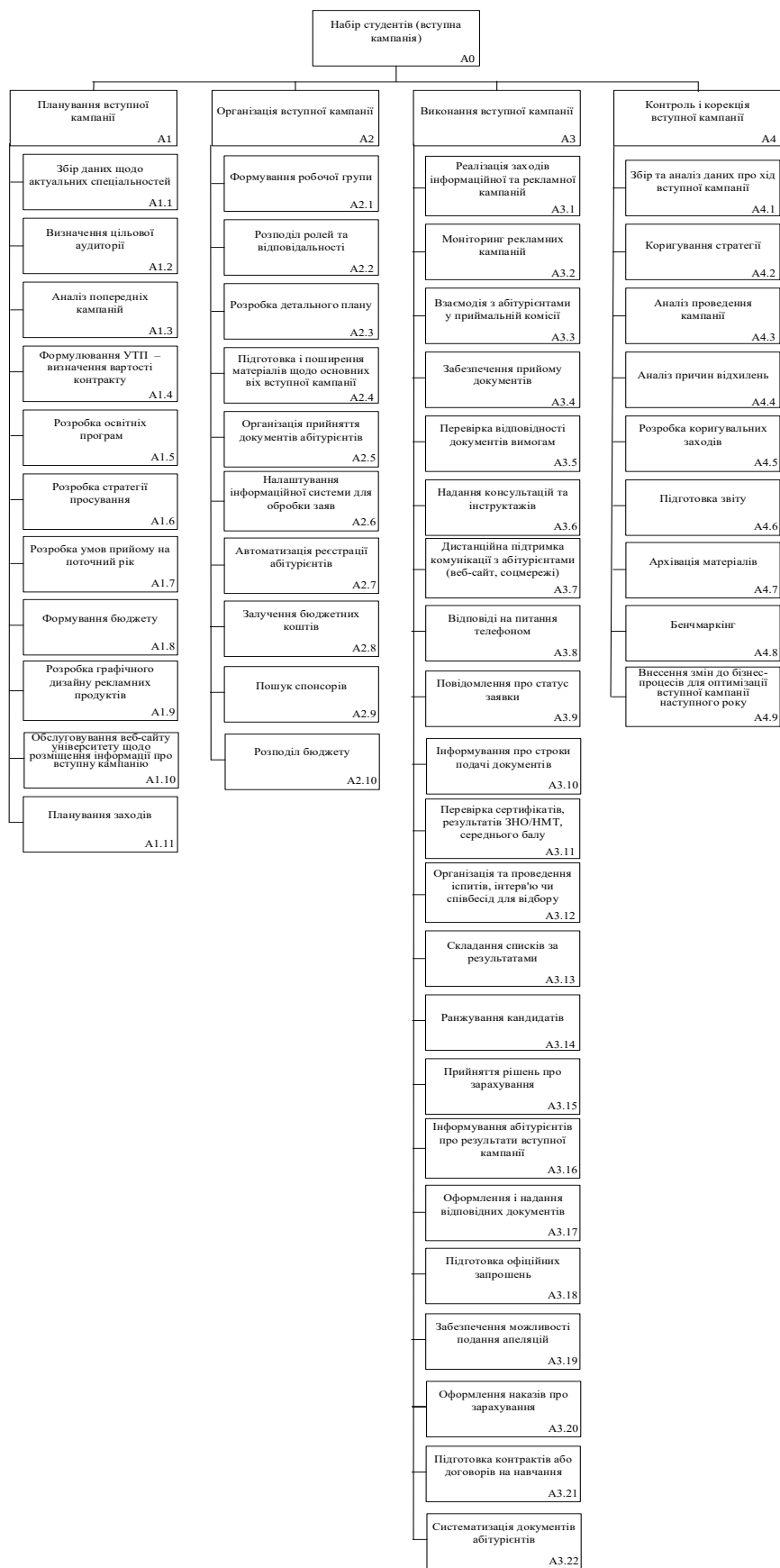


Рис. 3 – Модель дерева вузлів супроводу вступної кампанії у ДВНЗ «ПДТУ»

Подана модель дерева вузлів відображає основні етапи/підпроцеси вступної кампанії ДВНЗ «ПДТУ», а також підпроцеси для більш детального та комплексного підходу до їх аналізу.

Проведена декомпозиція є цілком достатньою для відображення підпроцесів та субпроцесів, що супроводжують вступну кампанію, та встановлення взаємозв'язків між ними. Відповідно, потреби в подальшій декомпозиції у межах даного дослідження немає. Проведені декомпозиції моделі «Набір студентів (вступна кампанія)» можуть стати підставою для більш глибокого аналізу окремих підпроцесів, процедур і т. ін. щодо супроводу вступної кампанії в ДВНЗ «ПДТУ».

Висновки

У даному дослідженні спроектовано структурно-функціональну модель бізнес-процесів щодо супроводу вступної кампанії ДВНЗ «ПДТУ» з позицій приймальної комісії як власнику бізнес-процесу «Набір студентів (вступна кампанія)». З метою візуалізації моделі було використано CASE-технологію у нотації IDEF0. Виокремлено та ідентифіковано підпроцеси вступної кампанії на основі проєктного підходу, а саме: планування вступної кампанії; організація вступної кампанії; виконання вступної кампанії; контроль та корекція. На другому рівні декомпозиції представлено модель дерева вузлів, яка дозволяє скласти детальне уявлення про структуру підпроцесів та субпроцеси вступної кампанії. Розроблена модель «AS-IS» («ЯК Є») може стати підставою для оптимізації окремих процесів і процедур, виявлення вузьких місць, дублювання функцій, упровадження заходів реінжинірингу, автоматизації та інформатизації бізнес-процесів, що супроводжують вступну кампанію, а також для розбудови моделі «TO-BE» («ЯК БУДЕ»). Дослідження такого спрямування можуть бути висвітлені у подальших наукових публікаціях за зазначеною тематикою.

Перелік використаних джерел:

1. Нетепчук В. В. Розробка моделі системи управління закладом вищої освіти з використанням методики процесного менеджменту та стандарту ISO 9001-2015. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки*. 2021. Т. 2. № 94. С. 112-127. DOI: <https://doi.org/10.31713/ve2202111>.
2. Андрусенко С. І., Бугайчук О. С. Процесна модель роботи приймальної комісії вищого навчального закладу. *Вісник Національного транспортного університету*. 2011. Вип. 24. Том 2. С. 63-66.
3. Андрусенко С. І., Бугайчук О. С. Процесна модель діяльності вищого навчального закладу з прийому студентів. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2012. Вип. 9. С. 7-13.
4. Макоєдова В. Моделювання супроводу вступної кампанії закладу вищої освіти. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 2023. С. 44-49. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.6>.
5. Коломієць М. Б., Мирний Р. Ф. Вступна кампанія закладу вищої освіти як система. *Вісник Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка. Серія: Педагогічні науки*. 2017. № 3. С. 105-111.

References:

1. V.V. Netepchuk, «Rozrobka modeli systemy upravlinnia zakladom vyshchoi osvity z vykorystanniam metodyky protsesnoho menedzhmentu ta standartu ISO 9001–2015» [«Development of a model of management system of higher education institution using the procedure management methodology and ISO 9001–2015 standard»], *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Ekonomichni nauky – Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. Economic Sciences*, vol. 2, № 94, pp. 112-127, 2021. doi: 10.31713/ve2202111. (Ukr.)
2. S.I. Andrusenko, and O.S. Bugaychuk, «Protseсна model' roboty pryymal'noyi komisiyi vyshchoho navchal'noho zakladu» [«Process model of the admission committee of a higher educational institution»], *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – The National Transport University Bulletin*, vol. 24, iss. 2, pp. 63-66, 2011. (Ukr.)
3. S.I. Andrusenko, and O.S. Bugaychuk, «Protseсна model' diyal'nosti vyshchoho navchal'noho zakladu z pryymannya studentiv» [«Process model of the activities of a higher educational institution

- for student admission»], *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka – Project Management, Systems Analysis and Logistics*, vol. 9, pp. 7-13, 2012. (Ukr.)
4. V. Makoyedova, «Modelyuvannya suprovodu vstupnoyi kampaniyi zakladu vyshchoyi osvity» [«Modeling the support of the admission campaign of a higher education institution»], *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo – Information Technologies and Society*, vol. 1(7), pp. 44-49, 2023. doi: 10.32689/maup.it.2023.1.6. (Ukr.)
 5. M.B. Kolomiets, and R.F. Mirnyi, «Vstupna kampaniya zakladu vyshchoyi osvity yak systema» [«Admission campaign of a higher education institution as a system»], *Hlukhivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Oleksandra Dovzhenka. Seriya: Pedahohichni nauky – Bulletin of Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv national pedagogical university*, vol. 3, pp. 105-111, 2017. (Ukr.)

Стаття надійшла 22.11.2024

Стаття прийнята 05.12.2024

УДК 004.932.4: 656.051

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321212

© Марченко І.Ф.¹, Балалаєва О.Ю.², Коротенко Г.М.³, Таразанов М.О.⁴

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У статті наведено результати дослідження алгоритмів стиснення зображень на основі нейронних мереж. Проаналізовано класичні методи стиснення, такі як JPEG, PNG, GIF, TIFF, а також виокремлено переваги нейромережових методів, зокрема використання автокодувальника, варіаційного автокодувальника, генеративних змагальних мереж. Зроблено висновок, що основними перевагами нейромережових методів є збереження високого рівня текстур та деталей при низьких бітрейтах, а також можливість роботи з високоякісними зображеннями, хоча це вимагає значних обчислювальних ресурсів. Проведено порівняльний аналіз класичних алгоритмів стиснення, таких як JPEG, з новими підходами на основі нейронних мереж на прикладі автокодувальника, а також оцінено перспективи нейронних мереж у вирішенні проблеми стиснення даних. Головний акцент зосереджено на аналізі якості відновлення зображень та рівня стиснення з використанням різних налаштувань нейронної мережі. Наведено математичну модель, яка описує принцип роботи автокодувальника та показує, як нейронна мережа кодує та відновлює зображення, використовуючи латентний простір. Для досягнення найкращої якості реконструкції використано гібридну функцію втрат, яка складається з трьох компонентів: перцептивної втрати на основі VGG16, SSIM-втрати та MSE-втрати. Для проведення експериментів розроблено модульну програмну систему за допомогою мови програмування Python. Програмне забезпечення включає в себе графічний інтерфейс, модуль стиснення для виконання операцій кодування та декодування зображення за допомогою моделі автокодувальника, а також модуль оцінки якості для розрахунку основних метрик якості (PSNR та SSIM). Встановлено, що традиційні методи стиснення зображень демонструють високу ефективність, але при цьому більше

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4566-3866, marchenko_i_f@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaeva_e_u@pstu.edu

³ д-р техн. наук, доцент, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3774-5260, korotenko.g.m@nmu.one

⁴ магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, tarazanov_m_o@pstu.edu

схильні до генерації артефактів, особливо при високих рівнях стиснення, ніж нейромережеві методи. У результаті проведених досліджень встановлено, що модель автокодувальника може кодувати та декодувати зображення з мінімальною втраченою якістю, на рівні з JPEG, проте поступається класичним алгоритмам у швидкості (1,6 секунди на зображення проти 0,02 для JPEG) та ступені стиснення (модель забезпечує зменшення розміру файлу на 11-18%). Зроблено висновок, що без зменшення потреби в обчислювальних ресурсах нейромережеві методи стиснення не зможуть замінити класичні методи.

Ключові слова: автокодувальник, стиснення зображень, нейронні мережі, JPEG, алгоритми стиснення.

I. Marchenko, O. Balalaieva, H. Korotenko, M. Tarazanov. Research of image compression algorithms using neural networks. The article presents the results of the study of image compression algorithms based on neural networks. Classical compression methods, such as JPEG, PNG, GIF, TIFF, are analyzed, and the advantages of neural network methods, in particular the use of an autoencoder, a variational autoencoder, and generative adversarial networks, are highlighted. It is concluded that the main advantages of neural network methods are the preservation of a high level of textures and details at low bitrates, as well as the ability to work with high-quality images, although this requires significant computing resources. A comparative analysis of classical compression algorithms, such as JPEG, with new approaches based on neural networks is carried out using the example of an autoencoder, and the prospects of neural networks in solving the problem of data compression are assessed. The main emphasis is placed on the analysis of the quality of image restoration and the level of compression using different neural network settings. A mathematical model is presented that describes the principle of operation of an autoencoder and shows how a neural network encodes and restores images using latent space. To achieve the best reconstruction quality, a hybrid loss function was used, which consists of three components: perceptual loss based on VGG16, SSIM loss, and MSE loss. A modular software system was developed using the Python programming language to conduct experiments. The software includes a graphical interface, a compression module for performing image encoding and decoding operations using an autoencoder model, and a quality assessment module for calculating the main quality metrics (PSNR and SSIM). It was found that traditional image compression methods demonstrate high efficiency, but are more prone to generating artifacts, especially at high compression levels, than neural network methods. As a result of the research, it was found that the autoencoder model can encode and decode images with minimal loss of quality, on a par with JPEG, but is inferior to classical algorithms in speed (1.6 seconds per image versus 0.02 for JPEG) and compression ratio (the model provides a reduction in file size by 11-18%). It is concluded that without reducing the need for computational resources, neural network compression methods will not be able to replace classical methods.

Keywords: autoencoder, image compression, neural networks, JPEG, compression algorithms.

Постановка проблеми. Розвиток інформаційних технологій та постійне збільшення обсягу цифрового контенту призводять до зростаючої потреби в ефективних методах стиснення даних. Зображення займають значну частину всіх цифрових даних, а ефективне стиснення є критично важливим для їх зберігання та подальшої передачі. Більшість традиційних методів стиснення під час роботи втрачають частину інформації та генерують артефакти, що погіршують якість зображення. Використання нейронних мереж для стиснення зображень має великий потенціал щодо забезпечення високої якості зображення у порівнянні з класичними методами при однаковому ступені стиснення. Даний напрям потребує подальшого вивчення та удосконалення для широкого впровадження в промислові та комерційні системи.

Протягом останнього десятиліття з'явилося багато досліджень, що спрямовані на оптимізацію стиснення зображень за допомогою нейронних мереж. Х. Лі та С. Джі, у роботі «Neural Image Compression and Explanation» [1], показали, що нейронні мережі здатні не лише зменшувати

обсяг зображень, але й зберігати їх важливі семантичні деталі. Їхня методика дозволяє стискати зображення до 60% від початкового розміру без втрати значущої інформації. Дослідження, проведене J. Ballé та іншими авторами в роботі [2], продемонструвало переваги end-to-end оптимізованого стиснення, яке використовує нелінійні трансформації для покращення якості відновлених зображень у порівнянні з традиційними методами. Хоча ці роботи демонструють великий потенціал нейронних мереж у стисненні зображень, їх впровадження часто вимагає великих обчислювальних ресурсів, що робить ці методи недосяжними для багатьох комерційних додатків.

Актуальність теми дослідження полягає в необхідності детального вивчення сучасних підходів до стиснення зображень, що враховують обмеження традиційних методів. Використання нейронних мереж для стиснення зображень є інноваційним напрямком, який має потенціал покращити ефективність та якість стиснення. Дослідження в цій галузі є важливими для подальшого розвитку технологій, особливо в контексті зростаючих обсягів цифрових даних.

Метою даної роботи є дослідження ефективності алгоритмів стиснення зображень на основі нейронних мереж та порівнянні їх з традиційними методами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичні методи стиснення зображень (JPEG, PNG, GIF, TIFF) мають як сильні, так і слабкі сторони. Наприклад, JPEG добре підходить для фотографій, але може створювати артефакти при сильному стисненні, тоді як PNG забезпечує високу якість, проте має більший розмір файлів. Вибір методу стиснення залежить від конкретних вимог до зображень, таких як якість, обсяг і тип контенту. Нейронні мережі можуть запропонувати нові підходи до стиснення зображень. Найбільша перевага нейронних мереж полягає у здатності навчатися на великих наборах даних, знаходити приховані патерни та виділяти головну інформацію на зображенні. Також нейронні мережі можуть бути адаптовані до специфічних типів зображень, таких як медичні чи супутникові знімки, що робить їх гнучким і універсальним інструментом.

Автокодувальник – різновид нейронної мережі, що використовується для кодування та декодування інформації [3]. Зазвичай використовується для зниження розмірності інформації або видалення шуму. Автокодувальник складається з двох частин: 1) кодувальник – відповідає за стиснення вхідних даних, під час стиснення мережа вивчає найважливіші характеристики даних, а також відкидає шуми та непотрібну інформацію; 2) декодувальник – бере стиснену інформацію та намагається відновити оригінальні дані якомога точніше. Перевагами використання автокодувальника є простота реалізації та налаштування, а також можливість адаптації до різних типів даних. В якості недоліків можна зазначити, що при використанні автокодувальника якість стиснення може бути нижчою порівняно з більш складними підходами, а латентний простір часто є лінійним, що обмежує можливості для роботи зі складними даними.

Варіаційний автокодувальник є розширенням класичного автокодувальника. Головною відмінністю є те, що замість визначеного вектора ознак у латентному просторі варіаційний автокодувальник використовує ймовірнісний розподіл для кодування вхідних даних [4]. Це дозволяє йому створювати більш узагальнені та гнучкі представлення даних. Варіаційний автокодувальник має гнучкий латентний простір, що дозволяє кодувати більш складні ознаки, може створювати нову інформацію на основі даних, яких мережа не бачила під час тренування, а також краще працює зі складними, нерівномірними розподілами даних. При цьому слід зауважити, що використання варіаційного кодувальника характеризується складнішим тренуванням порівняно з класичним автокодувальником та витратою більшого обсягу обчислювальних ресурсів.

Генеративні змагальні мережі (GAN) – це клас алгоритмів штучного інтелекту, що використовуються в некерованому навчанні, реалізовані системою двох штучних нейронних мереж, які змагаються одна з одною в рамках гри з нульовою сумою [5]. Одна мережа генерує кандидатів (генератор), а інша оцінює їх (дискримінатор). Як правило, генеративна мережа навчається будувати відповідності з латентного простору до певного розподілу даних, тоді як дискримінаційна мережа розрізняє представників справжнього розподілу даних та кандидатів, вироблених генератором. Метою навчання мережі є збільшення частоти помилок дискримінаційної мережі. Перевагами GAN є здатність працювати зі складними патернами та потенціал для генерації нових даних. Серед недоліків GAN можна виділити складне навчання, більший час та обсяг обчислювальних ресурсів для навчання, а також ризик генерації артефактів.

Зважаючи на переваги та недоліки методів, що були представлені вище, було прийнято рішення використовувати автокодувальник для проведення експериментів, що обумовлено простотою його реалізації та особливостями його роботи.

Розглянемо існуючі програмні засоби для стиснення зображень. У роботі [1] розглядається нова система, яка об'єднує пояснення згорткових нейронних мереж (CNN) та семантичне стиснення зображень в єдиний кінцевий процес. Автори розробляють структуру, яка пояснює передбачення CNN і водночас стискає вхідні зображення для ефективного зберігання або передачі. Цей метод пропонує інноваційне рішення, поєднуючи прозорість нейронних мереж та високу ефективність стиснення, що робить його особливо корисним для застосування в областях з обмеженими ресурсами для зберігання або передачі даних. В якості недоліків даного програмного забезпечення можна зазначити те, що маска, яку генерує алгоритм, може бути менш точною для зображень або класів, які не були використані для навчання, що призводить до неточностей у поясненнях або менш ефективного стиснення. Також вибір параметрів, таких як розмір блоків для стиснення, може впливати на компроміс між якістю зображення та рівнем стиснення.

Робота [2] представляє новий підхід до стиснення зображень за допомогою глибоких нейронних мереж, який оптимізований від початку до кінця з урахуванням компромісу між швидкістю передачі даних (rate) і спотвореннями (distortion). Автори використовують нелінійні трансформації, натхненні біологічними моделями нейронів, які значно покращують якість стиснених зображень у порівнянні зі стандартними методами JPEG та JPEG 2000. Метод демонструє суттєві покращення у стисненні зображень, особливо при низьких бітрейтах, що робить його перспективним для майбутнього використання в реальних додатках. Недоліками даного підходу є той факт, що оптимізація всіх параметрів моделі вимагає значних обчислювальних ресурсів і часу, а використання GDN та інших нелінійних трансформацій робить модель більш складною у впровадженні у порівнянні зі стандартними алгоритмами, такими як JPEG.

У роботі [6] представлено новий підхід до втратного стиснення зображень, який використовує GAN для забезпечення високої візуальної якості відновлених зображень при низьких бітрейтах. Основна ідея полягає у поєднанні генеративних моделей з методами стиснення, що дозволяє зберігати текстури та деталі зображень навіть при значному зменшенні їхнього розміру. GAN використовується для поліпшення якості відновлених зображень за допомогою дискримінатора, який «вчить» генератор генерувати реалістичні зображення. Введення втрат на основі перцептивної якості (Perceptual losses) дозволяє досягти високої схожості між відновленими та оригінальними зображеннями. Даний метод поєднує передові підходи у нейромережах та стисненні даних, забезпечуючи високу якість відновлених зображень. Але метод має наступні недоліки: зображення з маленькими деталями або текстом можуть втратити якість, особливо при дуже низьких бітрейтах; впровадження GAN для стиснення потребує значних обчислювальних ресурсів під час навчання, що може бути перешкодою для широкого використання на пристроях з обмеженими ресурсами.

Таким чином, серед основних переваг нейромережних методів можна зазначити збереження високого рівня текстур та деталей при низьких бітрейтах, а також можливість роботи з високоякісними зображеннями. Проте дані методи вимагають значних обчислювальних ресурсів та можуть мати проблеми з точністю для дуже малих деталей або тексту. Можна зробити висновок, що нейронні мережі дозволяють досягнути ефективного стиснення зображень, покращуючи баланс між розміром файлу та візуальною якістю, проте перед широким впровадженням цей напрям потребує більш глибоких досліджень.

Виклад основного матеріалу. Модель автокодувальника являє собою складну систему функцій, що виконує кодування та декодування вхідного зображення через нейронні мережі. Модель шукає таке латентне представлення даних, яке мінімізує втрати інформації при відновленні зображення [7].

Автокодувальник можна представити як пару функцій:

– кодувальник $E(X) = Z$, який зводить вхідне зображення $X \in \mathbb{R}^{H \times W \times C}$ до латентного простору $Z \in \mathbb{R}^d$, де $d \ll H \times W \times C$, H – висота, W – ширина, C – кількість каналів;

– декодувальник $D(Z) = \hat{X}$, який відновлює зображення $\hat{X}$, з латентного представлення Z .

Метою є знайти такі набори параметрів (ваг і зсувів) для кодувальника θ_E та декодувальника θ_D , які мінімізують різницю між вхідним зображенням X та відновленим $\hat{X}$.

Кодувальник виконує послідовні згорткові операції:

$$Z = f(X) = \text{ReLU}(\text{Conv}(X, W_1) + b_1), \quad (1)$$

де Conv – операція згортки, W_1 – матриця ваг фільтрів, b_1 – зсув, ReLU – функція активації.

Після кількох згорток отримуємо латентний вектор:

$$Z \in \mathbb{R}^d, \text{ де } d \ll H \times W \times C. \quad (2)$$

Декодувальник відновлює зображення з латентного простору за допомогою транспонованих згорткових шарів:

$$\hat{X} = g(Z) = \text{Sigmoid}(\text{ConvTranspose}(Z, W_2) + b_2), \quad (3)$$

де ConvTranspose – операція транспонованої згортки, а Sigmoid – функція активації, яка обмежує значення пікселів у діапазоні $[0, 1]$.

Алгоритм навчання моделі:

- 1) вхідне зображення X проходить через кодувальник та декодувальник, отримуючи $\hat{X}$;
- 2) використовується різниця між X та $\hat{X}$ для оцінки якості відновлення;
- 3) градієнти обчислюються та використовуються для оновлення ваг мережі;
- 4) алгоритм стохастичного градієнтного спуску або його варіанти використовуються для мінімізації різниці між X та $\hat{X}$

Особливості латентного простору:

- латентний простір має меншу кількість параметрів, ніж вхідні дані, що дозволяє стискати інформацію;
- латентне представлення містить лише важливі для реконструкції ознаки, усуваючи зайві деталі;
- латентний простір передбачає лінійну структуру, що може обмежувати можливість моделі працювати з дуже складними даними.

Наведена модель описує принцип роботи автокодувальника та показує, як нейронна мережа кодує та відновлює зображення, використовуючи латентний простір. Під час цього процесу частина інформації втрачається, у результаті чого зменшується розмір вихідного зображення. За умови, що модель навчена правильно, ця інформація не є важливою для візуального сприйняття зображення, тому можна говорити, що відбувається стиснення з втратами (Lossy). Цей підхід є основою для подальших досліджень у даній роботі.

Для того щоб навчити модель правильно виділяти ознаки на зображенні та досягти найкращої якості реконструкції, використовується гібридна функція втрат, яка складається з трьох компонентів: перцептивної втрати на основі VGG16, SSIM-втрати та MSE-втрати.

Перцептивна втрата (Perceptual Loss) використовує проміжні ознаки з нейронної мережі VGG16, яка була попередньо навчена на датасеті ImageNet. Вона забезпечує оцінку схожості між істинними зображеннями y_{true} та передбаченим y_{pred} на рівні ознак (feature maps), а не лише на рівні пікселів.

Формалізація:

$$L_{perc}(y_{true}, y_{pred}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi(y_{true})_i - \phi(y_{pred})_i)^2, \quad (4)$$

де ϕ – функція, що представляє обчислення ознак за допомогою VGG16; n – кількість значень у ознаках (feature maps); $\phi(y_{true})_i$ та $\phi(y_{pred})_i$ – значення i -тої ознаки для істинного та передбаченого зображень.

Ця частина функції втрат допомагає мережі зберігати високорівневі семантичні деталі зображень.

SSIM-втрата (Structural Similarity Index Loss – Індекс структурної подібності) вимірює схожість між двома зображеннями, беручи до уваги структурні характеристики, такі як яскравість, контраст, текстуру [8].

Формула для розрахунку SSIM:

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (5)$$

де x та y – області зображень, що порівнюються; μ_x та μ_y – середні значення інтенсивності пікселів для блоків x та y ; σ_x^2 та σ_y^2 – дисперсії інтенсивності для блоків x та y ; σ_{xy} – коваріація між x та y ; C_1 та C_2 – малі сталі, які запобігають діленню на нуль, зазвичай визначаються як

$C_1 = (K_1 L)^2$ і $C_2 = (K_2 L)^2$, де L – динамічний діапазон пікселів (255 для 8-бітних зображень), K_1 і K_2 – невеликі сталі, зазвичай 0,01 та 0,03.

Оскільки SSIM є мірою схожості (значення ближче до 1 означає кращу подібність), функція втрат визначається як:

$$L_{SSIM}(y_{true}, y_{pred}) = 1 - SSIM(y_{true}, y_{pred}), \quad (6)$$

де $SSIM \in [0,1]$ – значення подібності між зображеннями.

Ця функція покращує структурну подібність між вхідним і відновленим зображеннями.

MSE-втрата (Mean Squared Error Loss) вимірює середнє квадратичне відхилення між пікселями істинного та передбаченого зображень:

$$L_{MSE}(y_{true}, y_{pred}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{true,i} - y_{pred,i})^2, \quad (7)$$

де m – кількість пікселів у зображенні; $y_{true,i}$ та $y_{pred,i}$ – значення інтенсивності i -го пікселя у відповідних зображеннях.

Ця частина функції втрат мінімізує числову різницю між оригінальним та відновленим зображеннями.

Гібридна функція втрат – це лінійна комбінація трьох описаних вище втрат:

$$L_{hybrid}(y_{true}, y_{pred}) = a \cdot L_{SSIM}(y_{true}, y_{pred}) + b \cdot L_{perc}(y_{true}, y_{pred}) + c \cdot L_{MSE}(y_{true}, y_{pred}), \quad (8)$$

де a, b, c – коефіцієнти значущості показника, $a + b + c = 1$.

Така функція втрат дозволяє балансувати між числовою точністю, структурною подібністю та високорівневими ознаками.

Для реалізації експерименту за допомогою мови програмування Python було розроблено модульну програмну систему (рисунок 1), яка включає наступні компоненти:

– графічний інтерфейс користувача – забезпечує взаємодію з користувачем, вибір моделі для стиснення та робочих папок, а також за відображення результатів та графіків.

– модуль стиснення – виконує операції кодування та декодування зображення за допомогою моделі автокодувальника;

– модуль оцінки якості – виконує розрахунки основних метрик якості, а саме PSNR та SSIM.



Рис. 1 – Графічний інтерфейс користувача

Під час розробки програми були використані наступні сторонні бібліотеки: tensorflow версії 2.17.0, keras, numpy, pillow, matplotlib, scikit-image, ttkbootstrap, opencv-python, scipy.

Для проведення експериментів було розроблено 4 конфігурації моделі автокодувальника: з 3 шарами, 5 шарами, 7 шарами та 10 шарами згортки.

Розглянемо результати роботи кожної з конфігурацій та порівняємо їх з методом JPEG.

Результати роботи автокодувальника з 3 шарами приведено на рисунку 2.

Оброблено 1000 зображень	
Автокодувальник	JPEG
Середній PSNR: 27.09	Середній PSNR: 41.11
Середній SSIM: 0.9738	Середній SSIM: 0.9742
Середній Compression Ratio: 1.11	Середній Compression Ratio: 4.58
Середній час на зображення: 1.46 сек	Середній час на зображення: 0.02 сек
Загальний час: 1519.46 сек	Загальний час: 92.07 сек

Рис. 2 – Результати роботи моделі з 3 шарами

Модель досягла показника SSIM на рівні 0,97, що відповідає налаштуванням якості 95 зі 100 для JPEG (де 100 – найвища якість зображення). Показник SSIM близький до 1 свідчить про високу структурну схожість стиснутого зображення з оригіналом. Графік розподілу SSIM представлений на рисунку 3.

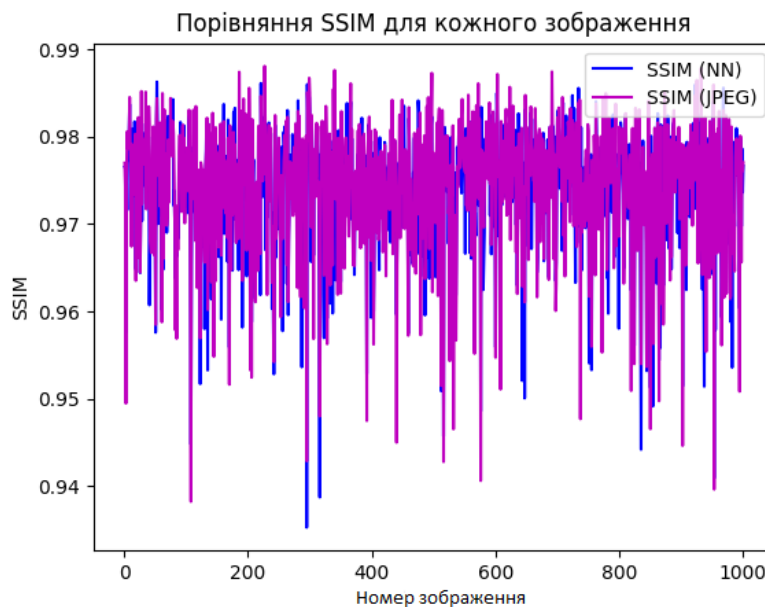


Рис. 3 – Розподіл SSIM для моделі з 3 шарами

PSNR для JPEG становить 41,11 dB, тоді як для автокодувальника – 27,09 dB. Більше значення PSNR у JPEG вказує на те, що з математичної точки зору зображення, яке було стиснуто JPEG, ближче до оригіналу, ніж зображення, яке було стиснуто моделлю. Попри те, що PSNR є важливим показником якості, він не завжди точно відображає візуальне сприйняття. Розподіл значень PSNR наведено на рисунку 4.

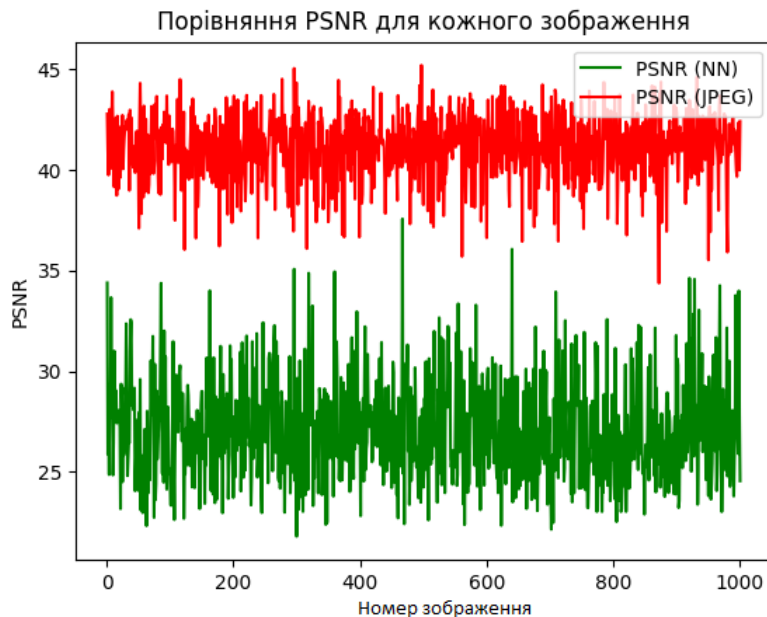


Рис. 4 – Графік розподілу PSNR для моделі з 3 шарами

Ступінь стиснення у JPEG (4,58) майже в 4 рази перевищує ступінь стиснення моделі (1,11). Отже, автокодувальник на даному етапі демонструє обмежену ефективність стиснення. Це говорить про те, що модель навчилася ефективно кодувати та декодувати зображення без суттєвої втрати інформації, що позитивно впливає на якість вихідних зображень, але негативно впливає на ступінь стиснення. Розподіл ступеня стиснення представлено на рисунку 5.

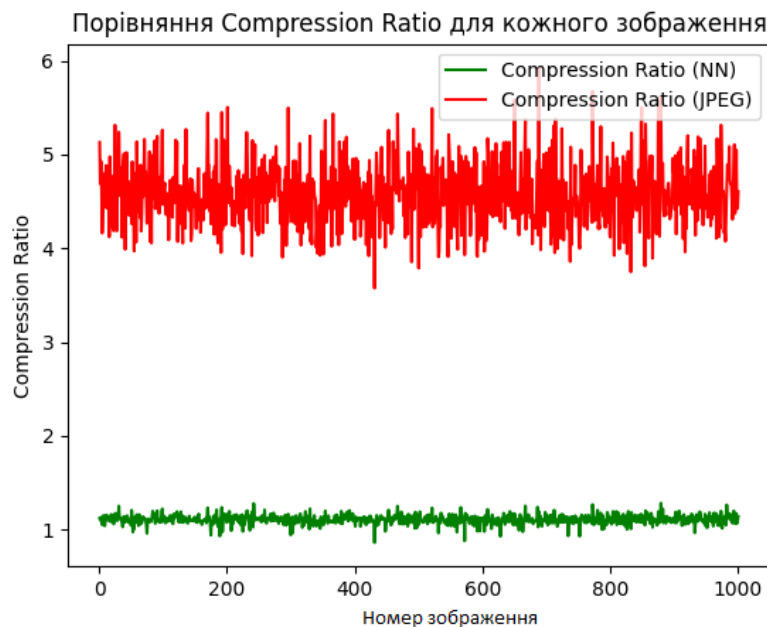


Рис. 5 – Розподіл Compression ratio для моделі з 3 шарами

JPEG значно перевершує автокодувальник за швидкодією: 92,07 секунд проти 1519,46 секунд. Це очікуваний результат, оскільки алгоритми на основі нейронних мереж зазвичай потребують більше обчислювальних ресурсів.

Візуальне порівняння вихідних зображень представлено на рисунку 6 та 7.



(а)

(б)

(в)

Рис. 6 – Порівняння деталей зображення для моделі з 3 шарами: оригінальне зображення (а); автокодувальник (б); JPEG (в)



(а)

(б)

Рис. 7 – Порівняння деталей зображення для моделі з 3 шарами: модель (а); JPEG (б)

Візуально обидва зображення схожі на оригінал та не мають явних артефактів.

Ці результати вказують на те, що, хоча автокодувальник досягає високої якості зображення за SSIM, йому ще бракує ефективності в стисненні та швидкодії порівняно з JPEG.

Розглянемо роботу автокодувальника з 5 шарами та порівняємо з JPEG (рисунок 8).

Оброблено 1000 зображень	
Автокодувальник	JPEG
Середній PSNR: 25.78	Середній PSNR: 36.37
Середній SSIM: 0.9392	Середній SSIM: 0.9405
Середній Compression Ratio: 1.18	Середній Compression Ratio: 12.03
Середній час на зображення: 1.67 сек	Середній час на зображення: 0.01 сек
Загальний час: 1729.73 сек	Загальний час: 88.77 сек

Рис. 8 – Результати роботи моделі з 5 шарами

Модель показує SSIM 0,93, що приблизно відповідає налаштуванням 75/100 для JPEG. У порівнянні з моделлю з 3 шарами бачимо невелике падіння в якості (рисунок 9).

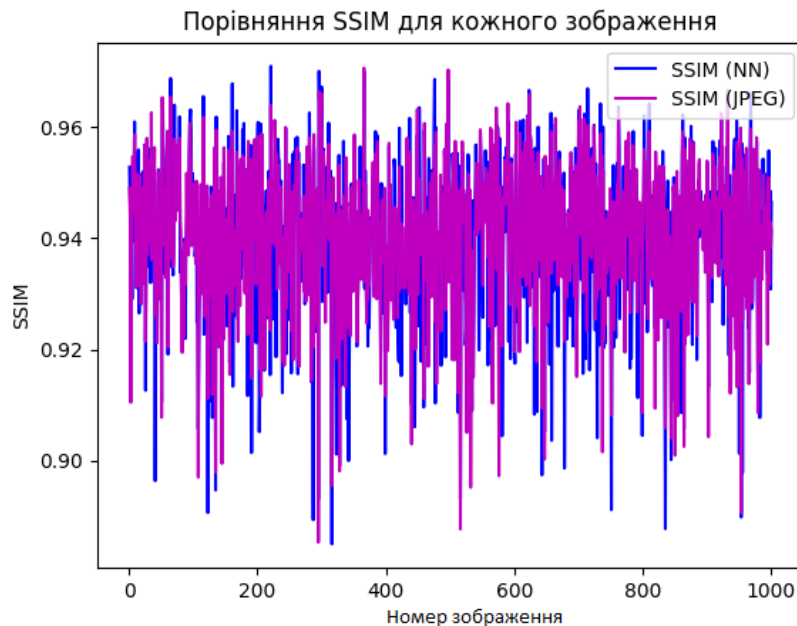


Рис. 9 – Розподіл SSIM для моделі з 5 шарами

Модель з 5 шарами також поступається JPEG за показником PSNR (25,78 проти 36,37), проте можна побачити що розрив стає меншим (рисунок 10).

Особливість JPEG в тому, що цей метод дозволяє налаштовувати компроміс між якістю та стисненням. Тобто зі зменшенням SSIM буде збільшуватись ступінь стиснення, що можна побачити за результатами експериментів.

Модель автокодувальника з 5 шарами показує трохи кращу ступінь стиснення, ніж модель з 3 шарами (1,11 проти 1,18), проте у порівнянні з JPEG різниця незначуща. Графік розподілу ступеня стиснення представлений на рисунку 11.

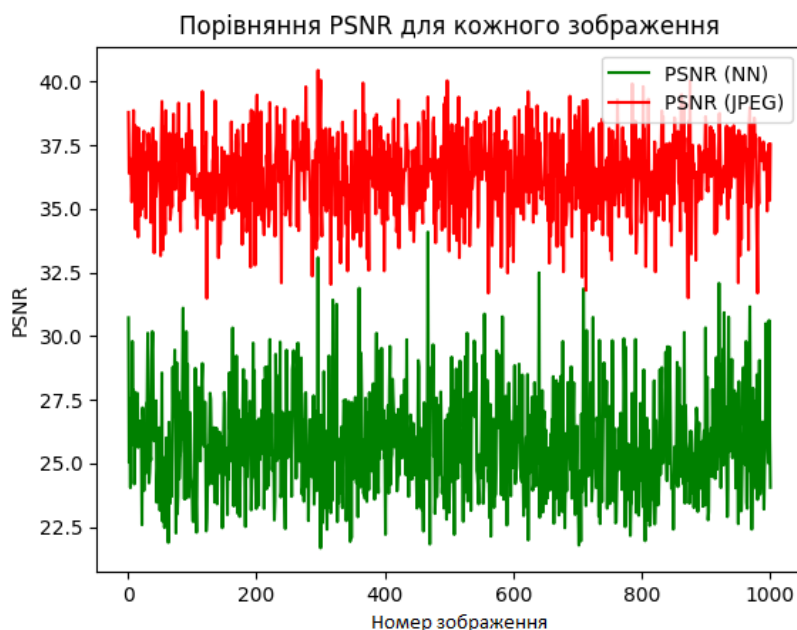


Рис. 10 – Розподіл PSNR для моделі з 5 шарами

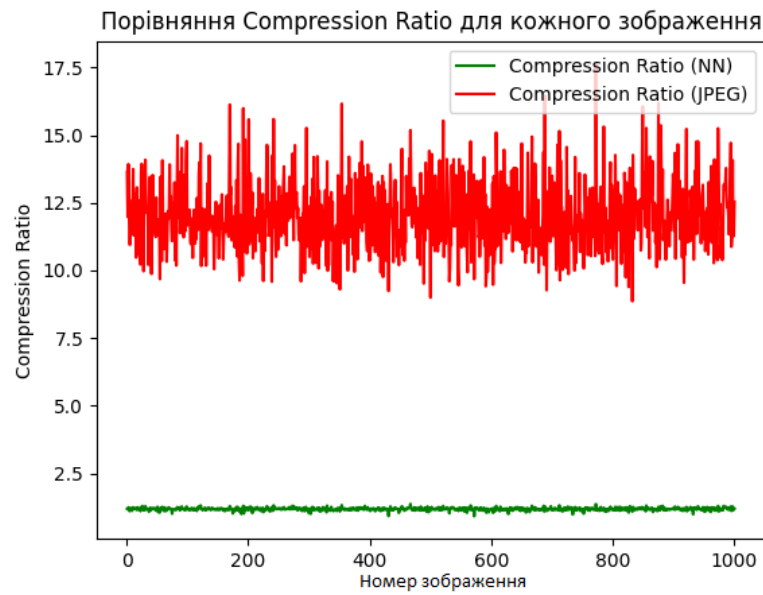


Рис. 11 – Графік Compression ratio для моделі з 5 шарами

Візуальне порівняння представлено на рисунках 12 та 13.

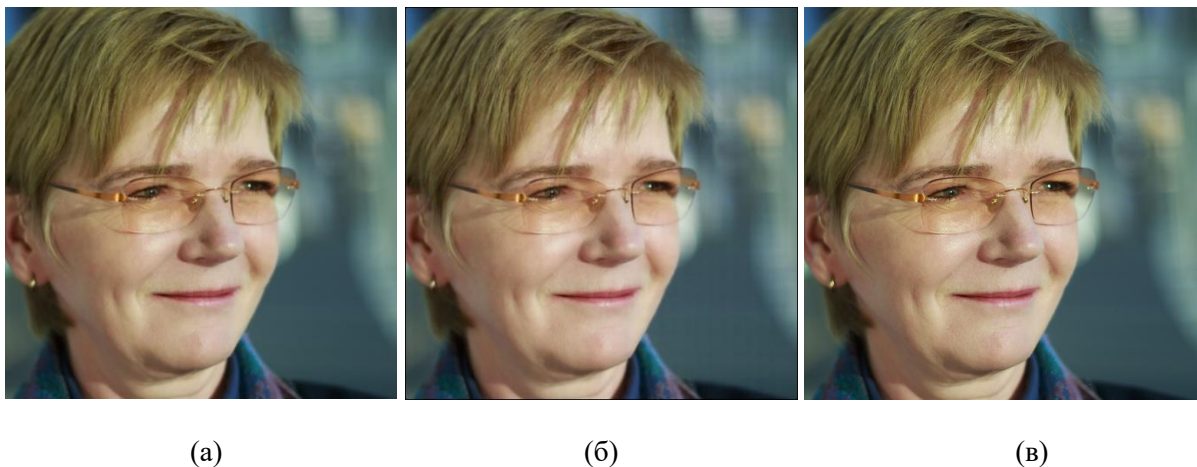


Рис. 12 – Порівняння деталей зображення для моделі з 5 шарами: оригінальне зображення (а); автокодувальник (б); JPEG (в)

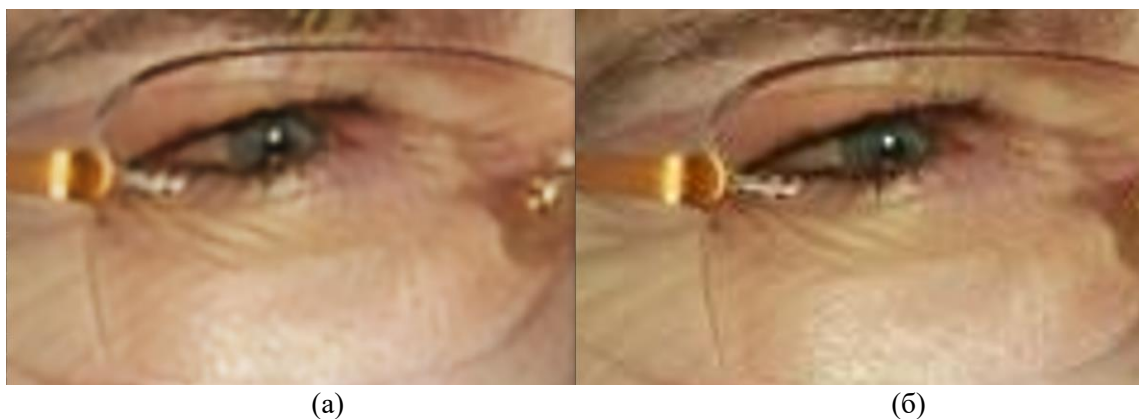


Рис. 13 – Порівняння деталей зображення для моделі з 5 шарами: модель (а); JPEG (б)

Зображення все ще дуже схожі на оригінал, проте вже можна побачити невелику різницю у кольорі.

У порівнянні з попередньою моделлю з 3 шарами, можна побачити невелике падіння таких показників, як SSIM та PSNR. При цьому наявний невеликий приріст ступеня стиснення. Отже, процес стиснення за допомогою моделі автокодувальника є стисненням з втратами, а ступінь стиснення залежить від якості вихідних зображень.

Розглянемо модель автокодувальника з 7 шарами (рисуюнок 14).

Оброблено 1000 зображень	
Автокодувальник	JPEG
Середній PSNR: 23.70	Середній PSNR: 31.43
Середній SSIM: 0.8528	Середній SSIM: 0.8559
Середній Compression Ratio: 1.37	Середній Compression Ratio: 32.25
Середній час на зображення: 1.62 сек	Середній час на зображення: 0.02 сек
Загальний час: 1684.44 сек	Загальний час: 93.57 сек

Рис. 14 – Результати роботи моделі з 7 шарами

SSIM 0,85 відповідає налаштуванням 20/100 для JPEG.

Можна побачити сильне падіння SSIM, що є першою ознакою перенавчання (overfitting) моделі. Вона має занадто багато параметрів, що дозволяє їй «запам'ятовувати» тренувальні дані замість того, щоб узагальнювати їх. У даному випадку вихідні зображення все ще мають чітку структуру, особливо при порівнянні з JPEG, де вже можна побачити «блокування» зображення. Проте на вихідних зображеннях майже повністю відсутній зелений колір (рисуюнок 15) та деякі дрібні деталі зображення починають розмиватись (рисуюнок 16).

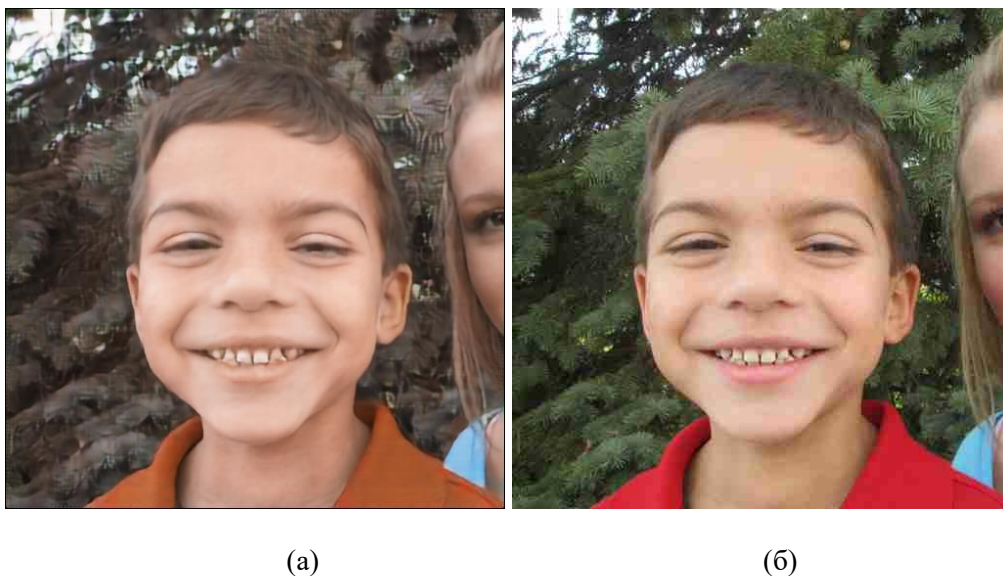


Рис. 15 – Результат роботи моделі з 7 шарами: модель (a); JPEG (б)



Рис. 16 – Розмиття дрібних деталей зображення при роботі моделі з 7 шарами

На основі цього можна сказати, що для зображень розміром 128x128 пікселів недоцільно використовувати модель, у якій більше 5 шарів згортання.

Роздивимось приклад дуже серйозного перенавчання на основі моделі з 10 шарами (рисунок 17). SSIM 0,80 приблизно дорівнює налаштуванням 13/100 для JPEG.

Оброблено 1000 зображень	
Автокодувальник	JPEG
Середній PSNR: 22.61	Середній PSNR: 29.87
Середній SSIM: 0.8062	Середній SSIM: 0.8147
Середній Compression Ratio: 1.51	Середній Compression Ratio: 40.82
Середній час на зображення: 1.58 сек	Середній час на зображення: 0.01 сек
Загальний час: 1642.42 сек	Загальний час: 85.40 сек

Рис. 17 – Результати роботи моделі з 10 шарами

Через сильне перенавчання модель генерує артефакти, як представлено на рисунках 18 та 19. Загалом, на вихідних зображеннях дуже часто можна побачити частини обличчя або навіть цілі обличчя там, де їх не повинно бути.



Рис. 18 – Результат роботи моделі з 10 шарами



Рис. 19 – Спотворене зображення в результаті стиснення при роботі моделі з 10 шарами

Підсумки проведеного дослідження демонструють, що на даному етапі нейронні мережі не можуть замінити класичні методи стиснення, і що ця тема потребує подальшого дослідження. На прикладі базового автокодувальника показано, що нейронні мережі здатні відтворювати зображення з достатньою якістю, однак наразі вони не досягають ефективності класичних методів у плані стиснення та затрат на час. Також було доведено, що занадто глибокі моделі гірше справляються з задачею. Отже, для стиснення однотипних зображень, розміром 128x128 пікселів, доцільно використовувати поверхневі (shallow) нейронні мережі з 2-3 шарами.

Основними викликами на даному етапі є недостатнє стиснення даних та дуже велика потреба у обчислювальних ресурсах. Перша проблема потребує подальшої оптимізації моделі та розробки функції втрат, яка б навчила модель компромісу між стисненням та якістю, тоді як друга потребує застосування сучасних методів компресії моделей, зокрема квантизації та видалення «мертвих» нейронів та ваг (pruning).

Висновки

Таким чином, було встановлено, що традиційні методи стиснення зображень демонструють високу ефективність, але при цьому генерують артефакти, особливо при високих рівнях стиснення, тоді як нейромереві методи менше схильні до генерації артефактів.

У ході роботи було розроблено модель автокодувальника для стиснення зображень. Проведені експерименти засвідчили, що запропонована модель здатна зберігати ключові структурні елементи, але показала дуже низький ступінь стиснення у порівнянні з JPEG.

Експериментальним шляхом було виявлено максимальну допустиму кількість шарів згортання у моделі. Так, для зображень розміром 128x128 пікселів, максимально допустима кількість шарів згортання становить 5, оптимальним рішенням буде використовувати 2-3 шари згортання.

У результаті аналізу експериментальних даних було виявлено, що головною проблемою нейромережевого підходу є низький ступінь стиснення та висока ресурсомісткість. Подальша оптимізація архітектури моделі може підвищити ефективність стиснення. Для покращення результатів було запропоновано провести оптимізацію та компресію моделі. Проведені дослідження свідчать, що без зменшення потреби в обчислювальних ресурсах нейромереві методи стиснення не зможуть замінити класичні методи.

Перелік використаних джерел:

1. Li X., Ji S. Neural Image Compression and Explanation. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 214605-214615. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041416>.
2. Ballé J., Laparra V., Simoncelli E.P. End-to-end Optimized Image Compression. *ICLR 2017 : 5th International Conference on Learning Representations*, Toulon, France, 24-26 April 2017. Pp. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.01704>.
3. Autoencoders and their applications in machine learning: a survey / K. Berahmand Fet al. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57(2). Pp. 1-52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10662-6>.
4. Kingma D.P., Welling M. An introduction to variational autoencoders. *Foundations and trends in machine learning*. 2019. Vol. 12(4). Pp. 307-392. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>.
5. Generative Adversarial Nets / I. Goodfellow et al. *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems*, Montreal, Canada, 8-13 December 2014. Vol. 3(11). Pp. 2672-2680. DOI: <https://doi.org/10.1145/2969033.2969125>.
6. High-Fidelity Generative Image Compression / Mentzer F., Toderici G., Tschannen M., Agustsson E. *NeurIPS 2020 : Proceedings of the 34th Conference on Neural Information Processing Systems*, Vancouver, Canada, 6-12 December 2020. Pp. 11913-11924. DOI: <https://doi.org/10.5555/3495724.3496723>.
7. Bank D., Koenigstein N., Giryes R. Autoencoders. *Machine Learning for Data Science Handbook* / ed. by Rokach L., Maimon O., Shmueli E. Springer, Cham, 2023. Pp. 353-374. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24628-9_16.
8. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Wang Zh., Bovik A. C. , Sheikh H. R., Simoncelli E. P. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. Vol.13. No. 4. Pp. 600-612. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>.

References:

1. X. Li, and S. Ji, «Neural Image Compression and Explanation», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 214605-214615, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041416.
2. J. Ballé, V. Laparra, and E.P. Simoncelli, «End-to-end Optimized Image Compression», in Proc. 5th Int. Conf. on Learning Representations (ICLR 2017), Toulon, France, 2017, pp. 1-27. doi: 10.48550/arXiv.1611.01704.
3. K. Berahmand, F. Daneshfar, E.S. Salehi, Yu.Li, and Yue Xu, «Autoencoders and their applications in machine learning: a survey», *Artificial Intelligence Review*, vol. 57(2), pp. 1-52, 2024. doi: 10.1007/s10462-023-10662-6.
4. D.P. Kingma, and M. Welling, «An introduction to variational autoencoders. foundations and trends in machine learning», *Foundations and trends in machine learning*, vol. 12(4), pp. 307-392, 2019. doi: 10.48550/arXiv.1312.6114.
5. I. Goodfellow et al., «Generative Adversarial Nets», in Proc. International Conference on Neural Information Processing Systems, Montreal, Canada, 2014, pp. 2672-2680. doi: 10.1145/2969033.2969125.
6. F. Mentzer, G. Toderici, M. Tschannen, and E. Agustsson, «High-Fidelity Generative Image Compression», in Proc. 34th Conf. on Neural Information Processing Systems, Vancouver, Canada, 2020, pp. 11913-11924. doi: 10.5555/3495724.3496723.
7. D. Bank, N. Koenigstein, and R. Giryes, «Autoencoders», in *Machine Learning for Data Science Handbook*, L. Rokach, O. Maimon, E. Shmueli, Eds. Springer, Cham, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-24628-9_16.
8. Zh. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, E.P. Simoncelli «Image quality assessment: from error visibility to structural similarity», *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, 2004. doi: 10.1109/TIP.2003.819861.

Стаття надійшла 10.09.2024

Стаття прийнята 29.09.2024

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗМІН КОНЦЕНТРАЦІЇ
ЕМУЛЬСІЙ ТА ВМІСТУ МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК
У ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИНАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ MATLAB
ДЛЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ**

У статті представлено результати дослідження процесів моделювання змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах, що використовуються в умовах холодної прокатки. Основною метою роботи є розробка математичних моделей для опису залежностей між концентрацією емульсій та механічними домішками, а також оцінка швидкості їх змін у часі, що дозволить підвищити ефективність управління технологічними процесами та забезпечити стабільну якість продукції. Дослідження базується на аналізі експериментальних даних, отриманих для різних типів емульсолів, таких як «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «ОПТИМАЛ-ПРО» та «TRENOIL S 740», на реверсивному стані 1680 і безперервному чотирикільтовому стані «Тандем» в умовах ПАТ «Запоріжсталь». Моделі побудовано з використанням лінійної, квадратичної та експоненціальної апроксимації, а їх точність оцінено на основі коефіцієнта детермінації. Для автоматизації обробки даних застосовувалося програмне середовище MATLAB, яке забезпечило зручність роботи з великими масивами даних, можливість їх візуалізації та побудови апроксимаційних моделей. У результаті обробки експериментальних даних отримано оптимальні математичні моделі залежності концентрації емульсій від часу та концентрації механічних домішок від часу, а також розраховано швидкість змін зазначених параметрів. Аналіз взаємозв'язку між концентрацією емульсій і механічними домішками виявив точки екстремуму, зокрема максимальну концентрацію механічних домішок та критичні значення концентрацій, які є ключовими для забезпечення ефективності процесів змащування. Отримані результати дозволяють не лише глибше зрозуміти закономірності накопичення механічних домішок у технологічних рідинах, а й запропонувати інструменти для оптимізації технологічних процесів у промислових умовах. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані в існуючі системи контролю для забезпечення стабільності технологічних операцій.

Ключові слова: моделювання, концентрація емульсій, механічні домішки, технологічні рідини, MATLAB, апроксимація, коефіцієнт детермінації, холодна прокатка.

V. Kukhar, O. Spichak, O. Balalaieva, I. Marchenko. Development of mathematical models of changes in emulsion concentration and the content of mechanical impurities in technological fluids using the MATLAB package for experimental data processing. The article presents the results of the study of the processes of modeling changes in the concentration of emulsions and the content of mechanical impurities in technological fluids used in cold rolling conditions. The main goal of the work is to develop mathematical models to describe the relationships between the concentration of emulsions and mechanical impurities, as well as to estimate the rate of their changes over time, which will allow to

¹ д-р техн. наук, професор, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

² начальник відділу холодної прокату технічного управління, ПАТ «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, aleksandr.spichak@zaporizhstal.com

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaeva_e_u@pstu.edu

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4566-3866, marchenko_i_f@pstu.edu

increase the efficiency of technological process control and ensure stable product quality. The study is based on the analysis of experimental data obtained for different types of emulsions, such as «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «OPTIMAL-PRO» and «TRENOIL S 740», on the reversible state 1680 and the continuous four-cell state "Tandem" under the conditions of PJSC «Zaporizhstal». The models were built with high-precision linear, quadratic and exponential approximation, and their accuracy was assessed based on the coefficient of determination. To automate data processing, the MATLAB software environment was used, which provided convenience in working with large data sets, the ability to visualize them and build approximation models. As a result of processing the experimental data, optimal mathematical models of the dependence of the concentration of emulsions on time and the concentration of mechanical impurities on time were obtained, and the rate of change of these parameters was also calculated. Analysis of the relationship between the concentration of emulsions and mechanical impurities revealed extremum points, in particular the maximum concentration of mechanical impurities and critical concentration values, which are key to ensuring the efficiency of lubrication processes. The results obtained allow not only to better understand the patterns of accumulation of mechanical impurities in technological fluids, but also to offer tools for optimizing technological processes in industrial conditions. The proposed approaches can be integrated into existing control systems to ensure the stability of technological operations.

Keywords: modeling, emulsion concentration, mechanical impurities, process fluids, MATLAB, approximation, coefficient of determination, cold rolling.

Постановка проблеми. Розробка ефективних методів контролю та моделювання параметрів технологічних процесів є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у матеріалознавстві та промисловій хімії. Зокрема, вибір і аналіз відповідних математичних моделей дають змогу точніше прогнозувати поведінку складних систем і вдосконалювати управління процесами. Однією з актуальних задач у цих сферах є моделювання змін концентрації та механічних домішок у динаміці з використанням різних типів математичних моделей. Це завдання було досліджено на прикладі проблеми накопичення механічних домішок під час застосування емульсолів різних марок у процесі холодної прокатки в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Якість холоднокатаного прокату значною мірою залежить від складу прокатної емульсії, що впливає на чистоту поверхні, наявність на ній таких забруднень, як сажа, залишки емульсії та плями [1]. Для зменшення коефіцієнта тертя, оптимізації енергоспоживання, підвищення чистоти поверхні та мінімізації дефектів на комбінаті «Запоріжсталь» здійснюють випробування різних емульсолів [2, 3]. У цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» емульсол використовується для змащування травленого гарячекатаного підкату (наноситься під час змотування рулону за допомогою машини електростатичного промаслювання), а також на станах холодної прокатки, де він розчиняється у демінералізованій або технічній воді з концентрацією 1,5-3,0 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кожне виробництво потребує особливого підбору емульсолу з урахуванням обладнання та умов процесу, що включає лабораторні дослідження, виробничі випробування та контроль технологічних і якісних параметрів прокату [4-7]. Деякі властивості емульсолу, такі як схильність до утворення дефектів, здатність забезпечувати якість поверхні та зносостійкість, можна остаточно оцінити тільки у виробничих умовах. Основною вимогою до емульсолів для холодної прокатки є висока охолоджувальна здатність і повне вигорання олії під час відпалу при температурі 500°C. Жодна емульсія повністю не зникає під час відпалу, завжди залишаючи певний рівень коксових залишків [8].

Крім вибору типу емульсолу, важливо також забезпечити ретельне видалення емульсії з поверхні штаби, що виходить з останньої кліти стану, а також дотримуватися оптимальних параметрів її використання, таких як концентрація, вміст механічних домішок та гідралічних масел [9-12]. Встановлено, що концентрація масла в емульсії є основним фактором, який впливає на чистоту поверхні прокату. Дослідники [13] рекомендують підтримувати концентрацію емульсолу на рівні 2-2,5 %, що дозволяє знизити забруднення поверхні. Крім того, застосування високоефективних емульсолів з високим числом омилення може дозволити зниження концентрації без погіршення якості прокату [14].

Збільшення концентрації механічних домішок в емульсії негативно впливає на якість поверхні прокату, знижуючи його відбивну здатність та чистоту. Частинки заліза, що накопичуються в процесі прокатки, погіршують умови роботи валків, спричиняючи їх інтенсивне зношування та утворення нових домішок у емульсії. Це призводить до накопичення забруднень на поверхні прокату, які знижують його естетичні та функціональні властивості [15-18]. Надмірна концентрація цих домішок особливо шкідлива при подальшому відпалі холоднокатаних рулонів, оскільки сприяє утворенню дефектів типу «сажа». Це вимагає ретельного контролю за рівнем механічних домішок у емульсії, а також регулярної фільтрації або заміни, щоб забезпечити стабільність технологічного процесу та якість кінцевого продукту.

Застосування математичних методів обробки експериментальних даних дозволяє підвищити точність оцінки ефективності емульсолів, оптимізувати технологічні параметри їх використання та створити математичні моделі, що враховують взаємозв'язок між концентрацією, рівнем механічних домішок та якістю прокату. Побудова таких моделей сприяє прогнозуванню результатів у виробничих умовах, що дозволяє значно зменшити кількість експериментальних випробувань і забезпечити оптимальні умови для досягнення високої якості продукції.

Метою даної роботи є розробка методики випробувань емульсолів у виробничих умовах із використанням математичних методів аналізу експериментальних даних, що дозволить визначити оптимальні математичні моделі для опису експериментальних залежностей між концентрацією та механічними домішками в середовищі змінного часу та сформулювати основні технологічні прийоми використання емульсолів.

Виклад основного матеріалу. Методика дослідження ґрунтується на оцінці моделей за коефіцієнтом детермінації, який відображає точність апроксимації експериментальних даних. Для реалізації методики було обрано пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB, що забезпечує високу точність чисельних розрахунків і автоматизує процес обробки даних. Вихідними даними дослідження були графіки, отримані за результатами випробувань емульсолів різних марок «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «ОПТИМАЛ-ПРО» та «TRENOIL S 740» у процесі холодної прокатки в умовах ПАТ «Запоріжсталь» на реверсивному стані 1680 і на безперервному 4-клітьовому стані «Тандем».

Вибір оптимальної математичної моделі для опису експериментальних даних концентрації емульсії від часу $C(t) = f_C(t)$ та концентрації механічних домішок від часу $M(t) = f_M(t)$ проводили з використанням лінійної, квадратичної та експоненційної апроксимації. Найкращу модель обирали за найбільшим значенням коефіцієнта детермінації:

$$R^2 = 1 - \text{RSS}/\text{TSS}, \quad (1)$$

де RSS – сума квадратів залишків; TSS – загальна сума квадратів;

$$\text{RSS} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (2)$$

де Y_i – реальне значення змінної при i -му спостереженні; $\hat{Y}_i$ – модельне значення змінної при i -му спостереженні;

$$\text{TSS} = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \cdot R^2, \quad (3)$$

де $\bar{Y}$ – середнє значення змінної при спостереженні.

Для отримання залежності швидкості від часу $V_i(T_i)$ для ряду $Y_i(t_i)$ з нерівномірними часовими проміжками використовували формулу:

$$V_i = \Delta V / \Delta t = (Y_{i+1} - Y_i) / (t_{i+1} - t_i). \quad (4)$$

За відповідний момент часу для швидкості обирали середину інтервалу:

$$T_i = (t_{i+1} + t_i) / 2. \quad (5)$$

Знаходження показника швидкості може бути отримана також шляхом диференціювання за часом моделей $C(t) = f_C(t)$ та $M(t) = f_M(t)$:

$$dC(t) = df_C(t), \quad dM(t) = df_M(t). \quad (6)$$

Для автоматизації обробки даних використовували середовище програмування MATLAB (версія MATLAB R2022b) і відповідну високорівневу мову, яка базується на матричному представленні даних. MATLAB забезпечує широкий набір функцій, інтегроване середовище розробки, підтримку об'єктно-орієнтованого програмування та можливість інтеграції з іншими мовами програмування. Зчитування даних із файлів MS Excel здійснювалося у форматі «Таблиця» за допомогою вбудованої функції `readtable` (рисунок 1).

```
% Завантаження даних із файлу в таблицю
data = readtable('data.xlsx');
time = data.Time; % часові мітки в стовпці 'Time'
concentration = data.Concentration; % дані в стовпці 'Concentration'
```

Рис. 1 – Фрагмент коду для зчитування даних із файлів MS Excel

При моделюванні використовували вбудовану функцію `fit`, яка дозволяє отримувати апроксимації у вигляді багатьох алгебраїчних функцій. Приклад апроксимації квадратичної функції із розрахунком відповідного коефіцієнту детермінації, а також визначення коефіцієнтів отриманої квадратичної функції $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$, наведено на рисунку 2.

```
% Квадратична модель
quadraticModel = fit(time, concentration, 'poly2');
quadraticPred = quadraticModel(time); % Прогнозовані значення
quadraticR2 = 1 - sum((concentration - quadraticPred).^2) / sum((concentration - mean(concentration)).^2);
a = quadraticModel.p1;
b = quadraticModel.p2;
c = quadraticModel.p3;
```

Рис. 2 – Фрагмент коду для побудови квадратичної апроксимації та визначення коефіцієнтів отриманої моделі

Вибір найкращої апроксимації за максимальним значенням коефіцієнту детермінації реалізовували у блоці `switch-case`, як це наведено на рисунку 3.

```
% Визначення найкращої моделі за R^2
[~, bestModelIndex] = max([linearR2, quadraticR2, expR2]);
bestModelName = '';
bestModelPred = [];

switch bestModelIndex
case 1
    a = linearModel.p1;
    b = linearModel.p2;
    bestModelName = sprintf('Linear Model: y = %.6f * x + %.6f\n', a, b);
    bestModelPred = linearPred;
case 2
    a = quadraticModel.p1;
    b = quadraticModel.p2;
    c = quadraticModel.p3;
    bestModelName = sprintf('Quadratic Model: y = %.6f * x^2 + %.6f * x + %.6f\n', a, b, c);
    bestModelPred = quadraticPred;
case 3
    a = expModel.a;
    b = expModel.b;
    bestModelName = sprintf('Exponential Model: y = %.6f * exp(%.6f * x)\n', a, b);
    bestModelPred = expPred;
end
```

Рис. 3 – Фрагмент коду для визначення найкращої моделі за коефіцієнтом детермінації

Отримані результати були візуалізовані в MATLAB з використання функції `plot` (рисунк 4). Побудовано графіки залежностей концентрації емульсії від часу та вмісту механічних домішок від часу для усіх трьох моделей із зазначенням розрахованих значень R^2 . Для оптимальної моделі з максимальним значенням коефіцієнта детермінації додатково було відображення відповідне рівняння апроксимації.

```
% Побудова графіка даних і всіх трьох моделей з R^2 на графіку
figure;
plot(time, concentration, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k'); % Дані
hold on;
% Моделі
plot(time, linearPred, 'r-');
plot(time, quadraticPred, 'b-');
plot(time, expPred, 'g-');
% Макет графіка: осі, надписи, легенда
xlabel('Time, h');
ylabel('Concentration, %');
title('Concentration of Rolling Emulsion: Data and Trend Models');
legend('Data', sprintf('Linear Model (R^2 = %.6f)', linearR2), ...
    sprintf('Quadratic Model (R^2 = %.6f)', quadraticR2), ...
    sprintf('Exponential Model (R^2 = %.6f)', expR2));
grid on;
hold off;
```

Рис. 4 – Фрагмент коду для побудови графіки залежностей концентрації емульсії від часу та вмісту механічних домішок від часу для трьох моделей з зазначенням коефіцієнта детермінації

Розглянемо приклад обробки експериментальних даних для емульсолу «LUBRO DL ZPS», отримані у виробничих умовах реверсивного стану 1680.

Моделі залежності концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок від часу.

За результатами апроксимації було отримано по три моделі (лінійну, квадратичну та експоненційну) для залежності концентрації емульсолу від часу $C(t)$ (рисунк 5а) та залежності вмісту механічних домішок від часу $M(t)$ (рисунк 5б).

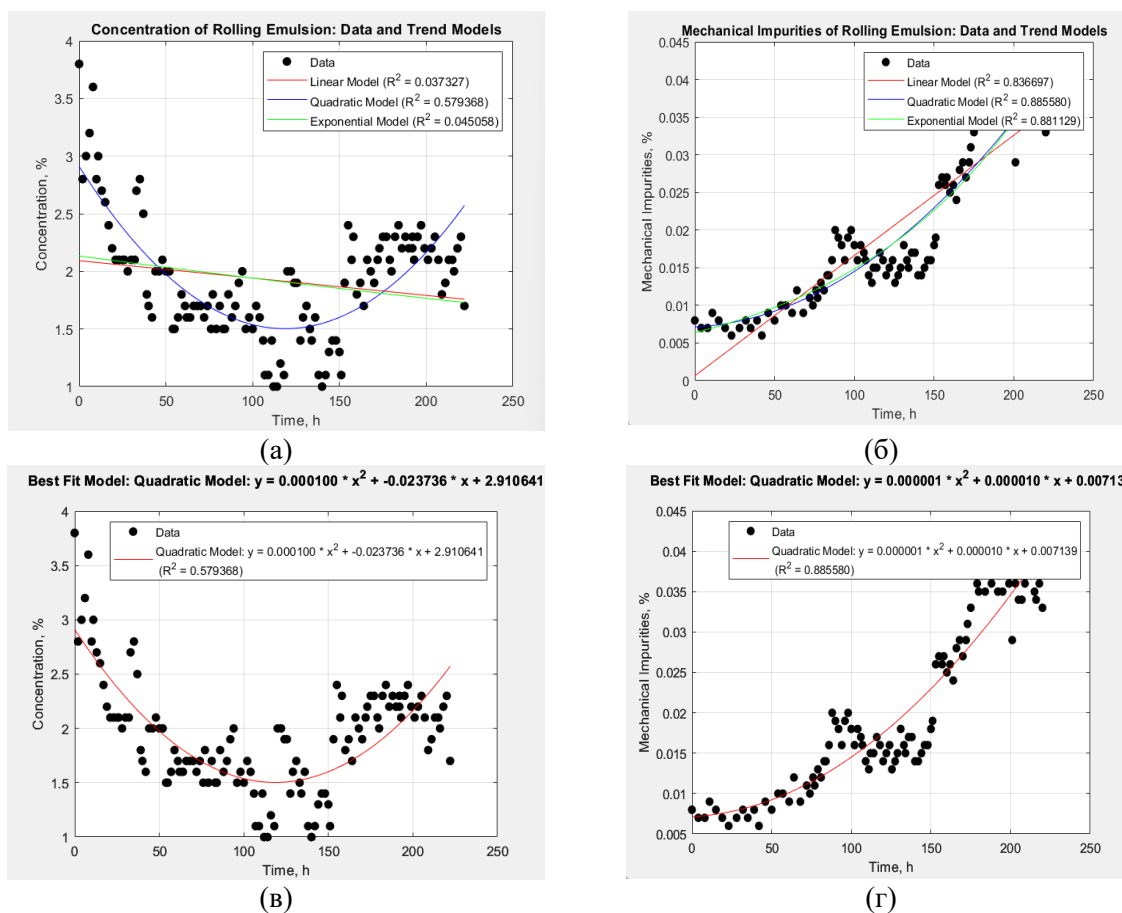


Рис. 5 – Залежність концентрації емульсії від часу (а) та залежність вмісту механічних домішок від часу (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності концентрації емульсії від часу (в); найкраща модель залежності вмісту механічних домішок від часу (г)

Оптимальну модель для кожного випадку було визначено за максимальним коефіцієнтом детермінації:

– залежність концентрації емульсолу (C , %) від часу (t , год.) (квадратичне рівняння, рисунок 5в):

$$C(t) = 0,0001t^2 - 0,023736t + 2,910641; (R^2 = 0,58); \quad (7)$$

– залежність вмісту механічних домішок (M) від часу (t) (квадратичне рівняння, рисунок 5в):

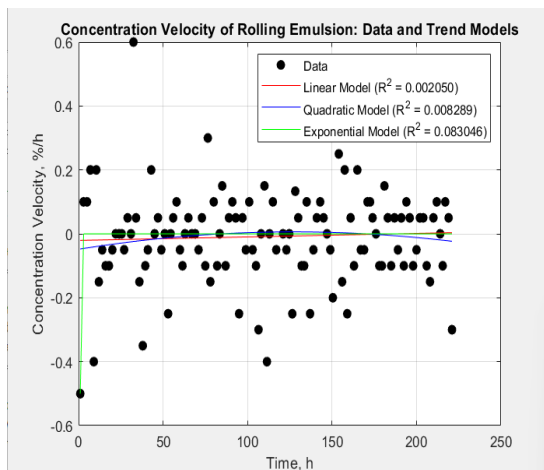
$$M(t) = 0,000001t^2 - 0,000010t + 0,007139; (R^2 = 0,886). \quad (8)$$

Моделі залежності швидкості зміни концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок від часу.

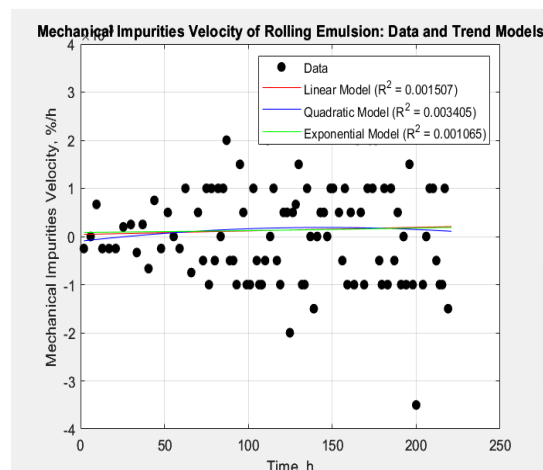
Усі моделі залежності швидкості зміни концентрації емульсолу від часу $CV(t)$ (рисунок 6а) та залежності швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу $MV(t)$ (рисунок 6б) отримані за результатами апроксимації, характеризувалися низьким значенням R^2 , тому оптимальні моделі для кожного випадку було знайдено як першу похідну від залежностей (7) та (8) відповідно (рисунки 6в та 6г):

$$CV(t) = dC(t)/dt = 0,000200t - 0,023736; \quad (9)$$

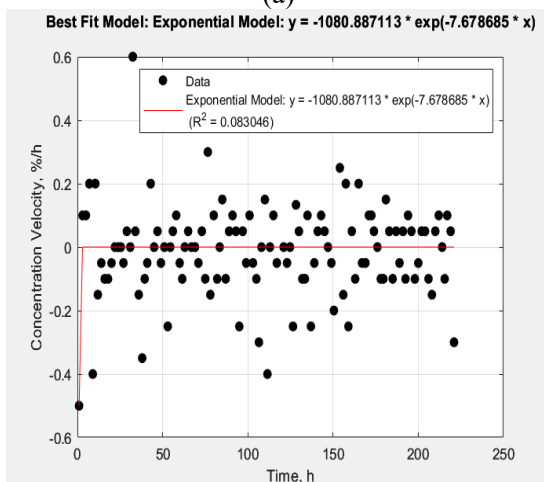
$$MV(t) = dM(t)/dt = 0,000002t - 0,00001. \quad (10)$$



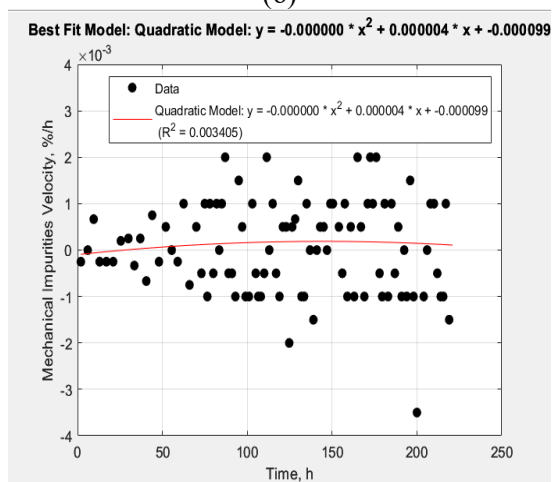
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 6 – Залежність швидкості зміни концентрації емульсії від часу (а) та залежність швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності швидкості зміни концентрації емульсії від часу (в); найкраща модель залежності швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу (г)

Моделі залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсолу та залежності концентрації емульсолу від вмісту механічних домішок.

Моделювання залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсії та зворотної залежності проводили також на основі отриманих даних спостережень за трьома моделями (рисунки 7а та 7б), після чого визначали оптимальні моделі для кожного випадку (рисунки 7в та 7г). Особливістю зчитування даних при цьому є необхідність виключення рядків, де відсутні значення за домішками та сортування матриць за зростанням концентрації. Далі моделювання проводили аналогічно обробці часових рядів.

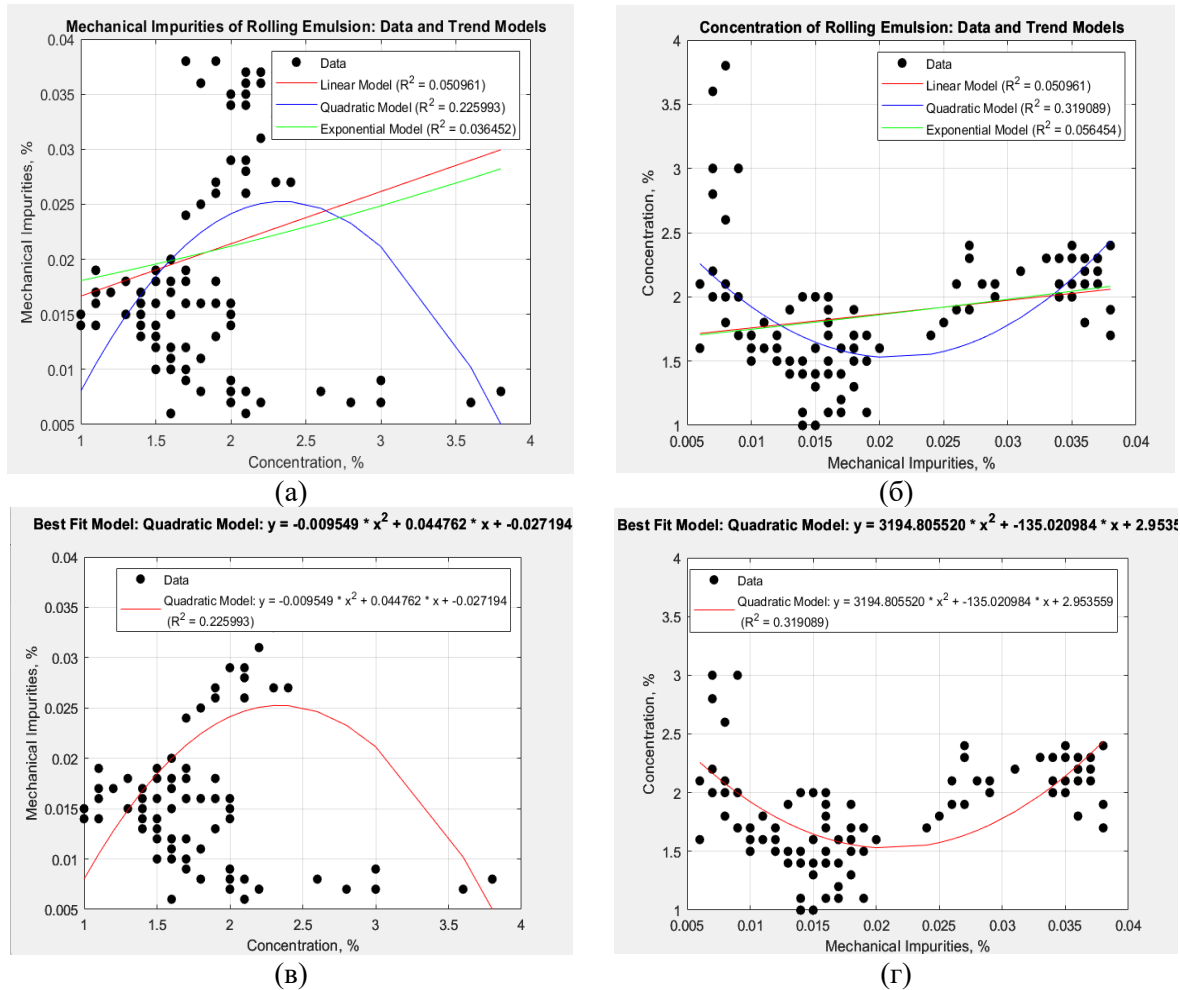


Рис. 7 – Залежність вмісту механічних домішок від концентрації емульсії (а) та залежність концентрації емульсії від вмісту механічних домішок (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсії (в); найкраща модель залежності концентрації емульсії від вмісту механічних домішок (г)

У результаті отримано залежність вмісту механічних домішок (M) від концентрації емульсії (C):

$$M(C) = -0,009549C^2 + 0,044762C - 0,027194; (R^2 = 0,225993). \quad (11)$$

Точку екстремуму (для максимуму домішок) визначено з рівняння (11):

$$C_0 = -b/2a = -0,044762/(2 \cdot (-0,009549)) \approx 2,3438 \%. \quad (12)$$

Підставляючи значення (12) у рівняння (11), отримали максимальну концентрацію механічних домішок, яка виявилася менше критичного значення ($M_{cr} = 0,05\%$):

$$M_{\max} = M(C_0) = -0,052456 + 0,104913 - 0,027194 = 0,025 \%. \quad (13)$$

Аналогічно отримано залежність концентрації емульсії (C) від механічних домішок (M):

$$C(M) = 3194,805520M^2 - 135,020984M + 2,953559; (R^2 = 0,319089). \quad (14)$$

Точку екстремуму (мінімум концентрації) визначено з рівняння (14):

$$M_0 = -b/2a = (-135,020984)/(2 \cdot 3194,805520) \approx 0,021 \%. \quad (15)$$

Для критичного значення $M_{cr} = 0,05\%$ знаходили критичне значення концентрації, при цьому критичне значення концентрації значно більше за спостережені значення:

$$C_{cr} = C(M_{cr}) = 7,987014 - 6,751049 + 2,953559 = 4,19 \%. \quad (16)$$

Висновки

Таким чином, за результатами проведених досліджень було обрано оптимальну математичну модель для опису експериментальних залежностей між концентрацією емульсії та вмістом механічних домішок. Відповідно до запропонованої методики було проаналізовано лінійну, квадратичну та експоненційну апроксимації, оцінюючи їх за коефіцієнтом детермінації. Визначено швидкість зміни концентрації емульсії та механічних домішок у часі, а також отримано відповідні математичні вирази шляхом диференціювання моделей. Проведено аналіз взаємозв'язку між концентрацією емульсії та механічних домішок, встановлено точки екстремуму та визначено критичні значення концентрацій для забезпечення ефективності процесів змашування і контролю технологічних параметрів.

Перелік використаних джерел:

1. Kukhar V., Malii Kh., Spichak O. Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27. No. 4/106-2022. Pp. 19-26. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26>.
2. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions / V. Kukhar et al. *MEES-2019 : IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 46-49. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>.
3. Synthesis Analysis of Energy Intensity Dependence for Tandem Mills Thin-Plate Rolling on Various Grade Emulsols Rheological Properties / V. Kukhar et al. *MEES-2023 : IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System*, Kremenchuk, Ukraine, 27-30 September 2023. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402500>.
4. Antonicelli M., Liuzzo U., Palumbo G. Evaluation of the Effect of a Natural-Based Emulsion on the Cold Rolling Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol. 7. Iss. 4. Article 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7040121>.
5. Shirizly A., Lenard J. G. Emulsions Versus Neat Oils in the Cold Rolling of Carbon Steel Strips. *Journal of Tribology*. 2000. Vol. 122. Iss. 3. Pp. 550-556. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.555400>.
6. Microstructural Evolution of Emulsion-Lubricated Cold-Rolled Steel Interface / J. Wang et al. *ACS Applied Engineering Materials*. 2024. Vol. 2. Iss. 8. Pp. 2201-2218. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c00374>.
7. Tieu A., Kosasih P. Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime. *Tribology Letters*. 2007. Vol. 25. Pp. 23-32. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9131-7>.
8. Николаев В. А. Трение и технологические смазки при прокатке. Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. 114 с.
9. Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials / B. Smeulders et al. *Iron & Steel Technology*. 2018. Vol. 15. No. 2. Pp. 60-68.
10. Taheri R. Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO₂-SiO₂ nanoparticle-stabilised soybean oil-in-water emulsions : a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy from the University of Wollongong. Wollongong, 2021. 214 p.
11. Krimpelstätter K., Bergmann M., Pröll C. Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. *Proceedings of the 10th International Rolling Conference and 7th European Rolling Conference*, Graz, Austria, 6-9 June 2016. Pp. 35-39.
12. Krimpelstätter K., Flaxa A. Minimum Quantity Roll-Gap Lubrication System – Field of Large Potential to Reduce Your OPEX. *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition : AISTech 2013 Proceedings*, Pittsburgh, 5-9 May 2013. Pp. 1655-1662.

13. Исследование минимально возможной концентрации водных эмульсий при холодной прокатке тонких полос / В. И. Капланов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Маріуполь, 2004. № 14. С. 150-155.
14. Василев Я. Д., Замогильний Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2>.
15. Mekicha M. A. Wear particles formation in cold rolling : PhD Thesis. University of Twente. Enschede: University of Twente, 2021. 143 p.
16. Sun J. L., Zhang B. T., Dong C. Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips. *Wear*. 2017. Vol. 376-377, Part A. Pp. 869-875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.012>.
17. Dick K., Lenard J. G. The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 168. Iss. 1. Pp. 16-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>.
18. Analysis and Prospects of Lubrication and Friction Characteristics in Cold Strip Rolling: A Review / Sh. Jin et al. *Steel Research International*. 2024. Vol. 96. Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202400258>.

References:

1. V. Kukhar, Kh. Malii, and O. Spichak, «Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill», *Problems of Tribology*, vol. 27, no. 4/106-2022, p. 19-26, 2022. doi: **10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26**.
2. V. Kukhar et al., «Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions», in Proc. 2019 IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 46-49. doi: **10.1109/MEES.2019.8896465**.
3. V. Kukhar, O. Spichak, I. Karmazina, K. Malii, E. Gribkov, and Y. Dobronosov, «Synthesis Analysis of Energy Intensity Dependence for Tandem Mills Thin-Plate Rolling on Various Grade Emulsols Rheological Properties», in Proc. 2023 IEEE 5th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-4. doi: **10.1109/MEES61502.2023.10402500**.
4. M. Antonicelli, U. Liuzzo, and G. Palumbo, «Evaluation of the Effect of a Natural-Based Emulsion on the Cold Rolling Process», *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, iss. 4, article 121, 2023. doi: **10.3390/jmmp7040121**.
5. A. Shirizly, and J.G. Lenard, «Emulsions Versus Neat Oils in the Cold Rolling of Carbon Steel Strips», *Journal of Tribology*, vol. 122, iss. 3, pp. 550-556, 2000. doi: **10.1115/1.555400**.
6. J. Wang, S. Wan, G. Yi, X. Yu, and Y. Shan, Microstructural Evolution of Emulsion-Lubricated Cold-Rolled Steel Interface, *ACS Applied Engineering Materials*, vol. 2, iss. 8, pp. 2201-2218, 2024. doi: **10.1021/acsaenm.4c00374**.
7. A. Tieu, and P. Kosasih, «Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime», *Tribology Letters*, vol. 25, pp. 23-32, 2007. doi: **10.1007/s11249-006-9131-7**.
8. V.A. Nykolaev, *Trenye y tekhnolohycheskye smazky pry prokatke* [Friction and technological lubrication in rolling]. Zaporozhye, Ukraine: RYO ZHYA Publ., 2002. (Rus.)
9. B. Smeulders, B. Zhu, Z. Song, D. Zhang, J. Melsen, and P. Schellingerhout, «Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials», *Iron & Steel Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 60-68, 2018.
10. R. Taheri, «Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO₂-SiO₂ nanoparticle-stabilised soybean oil-in-water emulsions», PhD thesis, University of Wollongong, Wollongong, 2021.
11. K. Krimpelstätter, M. Bergmann, and C. Pröll, «Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling», in Proc. 10th Int. Rolling Conf. and 7th European Rolling Conf., Graz, Austria, 2016, pp. 35-39.
12. K. Krimpelstätter, and A. Flaxa, «Minimum Quantity Roll-Gap Lubrication System — Field of Large Potential to Reduce Your OPEX», in Proc. The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2013), Pittsburgh, 2013, pp. 1655-1662.

13. V.Y. Kaplanov, N.V. Leporskaia, A.V. Shemiakyn, and E.V. Kaplanova, «Yssledovanye mynynalno vozmozhnoi kontsentratsyy vodnikh emulsiy pry kholodnoi prokatke tonkykh polos» [«Study of the minimum possible concentration of water emulsions in cold rolling of thin strips»], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, № 14, pp. 150-155, 2004. (Rus.)
14. J.D. Vasilev, R.O. Zamogilniy, and D.N. Samokysh, «Inzhenerna metodyka vyznachennia anty-fryktsiinoi efektyvnosti emulsoliv dlia kholodnoi prokatky po yikh fizyko-khimichnym vlastyviostiam» [«Engineering technique for determining antifiction efficiency of emulsols for cold rolling by their physical and chemical properties»], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, № 6, pp. 15-21, 2018. (Ukr.)
15. M.A. Mekicha, «Wear particles formation in cold rolling», PhD Thesis, University of Twente, Enschede, 2021.
16. J.L. Sun, B.T. Zhang, and C. Dong, «Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips», *Wear*, vol. 376-377, part A, pp. 869-875, 2017. **doi: 10.1016/j.wear.2016.12.012.**
17. K. Dick, and J.G. Lenard, «The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 168, iss. 1, pp. 16-24, 2005. **doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091.**
18. Sh. Jin, X. Li, H. Gao, P. Wang, and D. Zhang, «Analysis and Prospects of Lubrication and Friction Characteristics in Cold Strip Rolling: A Review», *Steel Research International*, vol. 96, iss. 1, 2024. **doi: 10.1002/srin.202400258.**

Стаття надійшла 28.06.2023

Стаття прийнята 18.07.2023

УДК 004.933:658.512

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321220

© Кривенко О.В.¹, Кузнецов В.О.²

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕІНЖІНІРИНГ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ФІРМИ З ПРОДАЖУ ПРОДУКЦІЇ СУШІ-МАРКЕТА

Робота присвячена моделюванню та реінжинірингу бізнес-процесів фірми з продажу продукції суші-маркету. Об'єкт дослідження охоплює бізнес-процеси, пов'язані з закупівлею інгредієнтів, приготуванням страв, управлінням запасами, обслуговуванням клієнтів і доставкою. Предметом дослідження є саме моделювання та реінжиніринг процесів, з особливим акцентом на аналіз поточного стану, визначення проблемних аспектів і запровадження нових рішень для підвищення ефективності. Метою даної роботи є розробка оптимізованих моделей бізнес-процесів на основі реінжинірингу, що дозволить підвищити ефективність компанії, знизити витрати, покращити якість продукції та рівень обслуговування. Встановлено, що реінжинірингу потребують бізнес-процеси «Діяльність суші-маркету», а саме його підпроцеси «Прийом та обробка замовлень», а також основним недоліком є відсутність доставки замовлень. Запропоновано заходи з реінжинірингу бізнес-процесів фірми з продажу продукції суші-маркету, які спрямовані на впровадження онлайн-служб з доставки замовлень, а саме додавання нових бізнес-процесів «Доставка замовлення», та встановлення зв'язку між іншими бізнес-процесами такими, як: «Приготування страв», «Прийом та обробка замовлень», «Здійснення фінансових

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-2860-6575, krivenko_o_v@pstu.edu

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, kuznecovvictor2001@gmail.com

операцій». Також були запропоновані заходи щодо впровадження системи управління складом для контролю кількості продуктів. Побудовано діаграми IDEF0, IDEF3 для варіантів «AS-IS» та «TO-BE», виконано їх порівняльний аналіз. Запропоновані моделі мають реальне практичне значення, адже можуть бути застосовані як у конкретних суши-маркетах, так і в аналогічних підприємствах харчової сфери. Впровадження реінжинірингу надає компаніям змогу підвищити свою конкурентоспроможність, стабілізувати та підсилити прибутковість, а також відповідати сучасним вимогам і очікуванням споживачів.

Ключові слова: моделювання бізнес-процесів, суши-маркет, онлайн сервіси доставки, доставка замовлень, обслуговування клієнта, приготування страв, реінжиніринг, методологія IDEF.

O.V. Kryvenko, V.O. Kuznetsov. Modeling and re-engineering of business processes of a company selling sushi-market products. The work is devoted to modeling and reengineering of business processes of a sushi market company. The object of the study covers business processes related to the purchase of ingredients, preparation of dishes, inventory management, customer service and delivery. The subject of the study is precisely the modeling and reengineering of processes, with a special emphasis on analyzing the current state, identifying problem aspects and implementing new solutions to increase efficiency. The purpose of this work is to develop optimized business process models based on reengineering, which will increase the efficiency of the company, reduce costs, improve product quality and service level. It was established that the business processes «Sushi market activities», namely its subprocesses «Order reception and processing», require reengineering, and the main drawback is the lack of order delivery. Measures were proposed to reengineer the business processes of a sushi market sales company aimed at implementing online order delivery services, namely, adding new business processes «Order Delivery» and establishing a connection between other business processes such as: «Dish Preparation», «Order Reception and Processing», «Financial Transactions». Measures were also proposed to implement a warehouse management system to control the quantity of products. IDEF0, IDEF3 diagrams were constructed for the «AS-IS» and «TO-BE» options, and their comparative analysis was performed. The proposed models have real practical significance, as they can be applied both in specific sushi markets and in similar food enterprises. The implementation of reengineering allows companies to increase their competitiveness, stabilize and strengthen profitability, and also meet modern consumer requirements and expectations. **Keywords:** business process modeling, sushi market, online delivery services, order delivery, customer service, food preparation, reengineering, IDEF methodology.

Keywords: business process modeling, sushi market, online delivery services, order delivery, customer service, food preparation, re-engineering, IDEF methodology.

Постановка проблеми. Незважаючи на високий попит на суши, бізнеси в цьому сегменті стикаються з низкою проблем, які гальмують їх розвиток. До таких проблем належать: висока конкуренція, сезонність попиту, складність управління запасами, забезпечення стабільної якості продукції та ефективної доставки. Для вирішення проблем необхідні глибокі дослідження та розробка ефективних стратегій управління бізнес-процесами. Дане дослідження спрямоване на виявлення та аналіз найбільш актуальних проблем суши-маркетів, а також на розробку практичних рекомендацій для їх вирішення.

Робота присвячена комплексному дослідженню та оптимізації бізнес-процесів фірми з продажу продукції суши-маркету в умовах зростаючої конкуренції та мінливих споживчих уподобань. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи підприємства, зниження витрат, покращення якості обслуговування та адаптації до нових цифрових технологій. Об'єктом дослідження є бізнес-процеси, пов'язані з закупівлею інгредієнтів, приготуванням страв, управлінням запасами, обслуговуванням клієнтів та доставкою. Предметом дослідження є моделювання та реінжиніринг процесів, з особливим акцентом на аналіз поточного стану, визначення проблемних аспектів і запровадження нових рішень для підвищення

ефективності. Метою даної роботи є розробка оптимізованих моделей бізнес-процесів на основі реінжинірингу, що дозволить підвищити ефективність компанії, знизити витрати, покращити якість продукції та рівень обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щоб успішно розвивати суши-бізнес, необхідно поєднати багатовікові традиції японської кухні з сучасними технологіями та трендами. Початково суши позиціонувалися як елітний продукт, доступний лише обраним. Однак, завдяки вдало продуманим маркетинговим кампаніям, суши стали доступними для широкого кола споживачів. Маркетологи активно використовували асоціації зі здоров'ям, свіжістю та екзотикою, що дозволило суши завоювати серця мільйонів людей по всьому світу [1].

Цифрові технології трансформують ринок суши, надаючи нові можливості для бізнесу та змінюючи споживчі звички. Для успішного розвитку суши-барів необхідно активно використовувати цифрові інструменти, адаптуватися до нових трендів та створювати інноваційні продукти та сервіси [2].

Суши-маркети стикаються з унікальними викликами, пов'язаними з якістю продуктів, конкуренцією та високими вимогами клієнтів. Забезпечити постійну свіжість інгредієнтів для суши – складне завдання через їхню делікатність [3]. Щоб зберегти довіру клієнтів, суши-бари повинні ретельно контролювати якість кожного інгредієнта [4].

Логістика для суши-маркетів дійсно має свої особливості, які вимагають ретельного підходу. Доставка суши супроводжується низкою специфічних викликів: швидкість доставки, температурний контроль і пікові години замовлень. Завдяки інноваціям, клієнти суши-барів можуть відстежувати свої замовлення в реальному часі та отримувати їх свіжими і гарячими, що робить процес замовлення їжі більш зручним і прозорим. Висока конкуренція змушує суши-бари постійно розвиватися. Вони пропонують різноманітне меню, індивідуальний підхід до клієнтів та впроваджують нові технології [5-8].

Критерії аналізу конкурентів суши-маркетів представлений в таблиці 1.

Таким чином, висока конкуренція на ринку суши-маркетів – виклик, але водночас і стимул для розвитку. Завдяки цьому споживачі отримують все більше можливостей насолодитися смачною і якісною японською кухнею.

Таблиця 1

Критерії аналізу конкурентів суши-маркетів

Критерій аналізу	Що аналізуємо?	Чому важливо?	Як збирати дані?
1	2	3	4
Асортимент продукції	Набір страв, сезонні пропозиції, унікальні позиції	Дозволяє визначити, чим відрізняється конкурент, які ніші він займає	Меню на сайті, у закладі, відгуки клієнтів
Цінова політика	Середня ціна на популярні позиції, акції, знижки, системи лояльності	Допомагає визначити цінову політику компанії, зрозуміти, на яку аудиторію вона орієнтована	Аналіз цін на сайті, у меню, інформація про акції
Якість продуктів	Свіжість інгредієнтів, смакові якості страв, розмір порцій	Дозволяє оцінити якість продукції конкурентів і визначити свої конкурентні переваги	Відгуки клієнтів на сайтах, у соцмережах, власні дегустації
Сервіс	Швидкість доставки, якість упаковки, обслуговування в закладі, додаткові послуги	Дозволяє оцінити рівень сервісу конкурентів і визначити, що можна покращити у власній компанії	Відгуки клієнтів, тайм-менеджмент доставки, спостереження за обслуговуванням
Маркетинг	Канали просування, рекламні кампанії, SMM, PR	Дозволяє оцінити ефективність маркетингових активностей конкурентів і визначити найбільш ефективні інструменти	Аналіз сайтів, соцмереж, рекламних оголошень, відстеження згадок у ЗМІ

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
Локація	Розташування закладів, доступність для клієнтів	Дозволяє оцінити географічне розташування конкурентів і визначити потенційні точки зростання	Карти Google, аналіз потоків клієнтів
Репутація	Відгуки клієнтів, рейтинг на різних платформах, участь у рейтингах	Дозволяє оцінити загальне враження про компанію у клієнтів	Відгуки на сайтах, у соцмережах, рейтинги на Google, TripAdvisor

Мета дослідження. Мета роботи полягає в тому, щоб суттєво покращити роботу суші-маркету шляхом кардинальної перебудови його внутрішніх процесів. Дозволити не лише знизити витрати та підвищити ефективність, але й значно покращити якість послуг та завоювати лідируючі позиції на ринку.

Основні етапи реінжинірингу бізнес-процесів у суші-маркеті:

- 1) Аналіз початкового стану
 - аналіз ринку: дослідження загальних тенденцій на ринку суші, виявлення нових можливостей та загроз;
 - аналіз конкурентів: порівняння з прямими конкурентами, виявлення їхніх сильних і слабких сторін;
 - аналіз внутрішніх процесів: детальне вивчення всіх етапів роботи компанії від закупівлі продуктів до доставки замовлення клієнту.
- 2) Виявлення проблем
 - ідентифікація вузьких місць: визначення етапів, які найбільше гальмують роботу компанії;
 - аналіз причин: з'ясування причин виникнення проблем (недостатня автоматизація, неефективна організація роботи тощо).
- 3) Моделювання процесів
 - візуалізація: створення графічних моделей, які наочно демонструють як працюють існуючі процеси;
 - глибокий аналіз: виявлення всіх взаємозв'язків та залежностей між різними етапами процесу.
- 4) Реінжиніринг
 - розробка нових моделей: створення нових, більш ефективних схем роботи;
 - оптимізація: спрощення процесів, усунення зайвих етапів, автоматизація рутинних операцій;
 - впровадження технологій: використання програмного забезпечення, обладнання для підвищення ефективності.
- 5) Оцінка ефективності
 - порівняльний аналіз: порівняння показників роботи до і після впровадження змін;
 - визначення KPI: вибір ключових показників ефективності, які дозволять оцінити успішність нових процесів.

Виклад основного матеріалу. Моделювання бізнес-процесів – потужний інструмент, який дозволяє візуалізувати та аналізувати всі етапи діяльності компанії. Для суші-маркету це означає створення графічного представлення того, як готуються, пакуються та доставляються суші від моменту замовлення до отримання клієнтом.

Моделювання та реінжиніринг об'єкта дослідження:

- 1) Контекстна діаграма «Діяльність суші-маркету».

Представлена контекстна діаграма є корисним інструментом для загального розуміння діяльності суші-маркету (AS-IS, Рис. 1, а) та TO-BE, Рис. 1, б)).

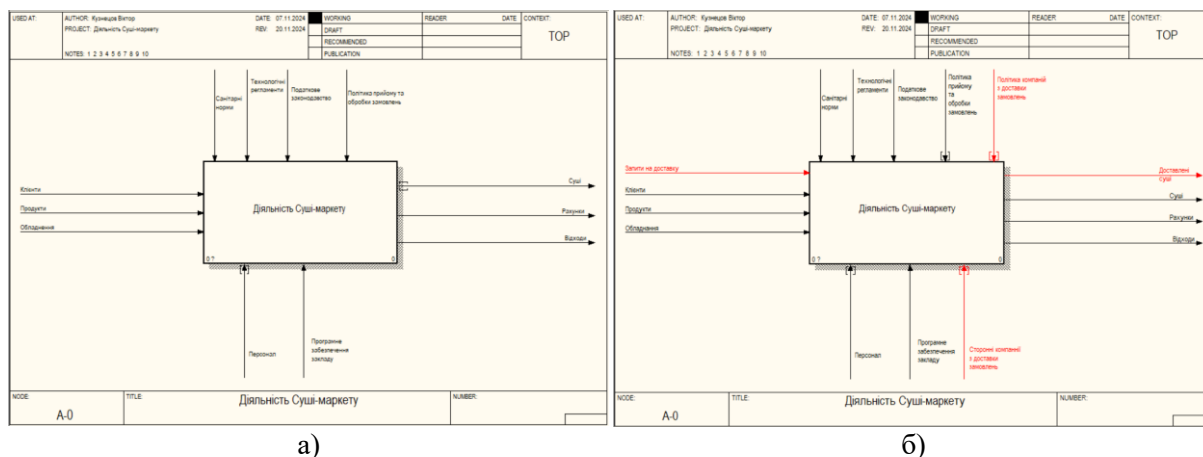


Рис. 1 – Контекстна діаграма «Діяльність Суші-маркету» AS-IS (а) та TO-BE (б)

Діяльність суші-маркету – центральний елемент діаграми, який обробляє входи та генерує виходи. Входи: Клієнти (замовлення, оплата), Продукти (інгредієнти для приготування суші (риба, рис, водорості тощо)), Обладнання (інструменти та прилади, необхідні для приготування та упаковки суші). Механізми: Персонал (кухарі, кур'єри, менеджери), Програмне забезпечення (системи для управління замовленнями, обліку товарів тощо). Технологічні регламенти (Стандарти приготування, гігієни, Податкове законодавство (вимоги до ведення бухгалтерського обліку та сплати податків), Санітарні норми (Правила гігієни та безпечності продуктів харчування), Політика прийому та обробки замовлень (Внутрішні процедури обробки замовлень)). Виходи: Замовлення (готові суші, напої), Відходи (сміття, залишки продуктів), Рахунки (фінансові документи) (див. Рис. 1, а). Червоним на діаграмі позначено стрілки, які було додано у порівнянні з попереднім варіантом (див. Рис. 1, б). Згідно з заходами реінжинірингу, доцільним стало впровадження функції доставки замовлень. Для цього було додано нову стрілку «Запити на доставку», що представляє можливість клієнтів запитувати доставку безпосередньо. Крім того, додано стрілку «Сторонні компанії з доставки замовлень», що означає залучення зовнішніх служб для виконання доставки.

Функціональна діаграма «Діяльність суші-маркету» AS-IS та TO-BE представлена на рис. 2, а) та б), відповідно. Весь процес «Діяльність Суші-маркету» розділяється на чотири підпроцеси (див. Рис. 2, а):

- «Прийом та обробка замовлення» – даний підпроцес спрямований на реєстрацію нових замовлень та передачі їх на кухню для подальшого їх приготування;
- «Приготування страв» – даний підпроцес спрямований на безпосередньо на приготуванні страв;
- «Обслуговування клієнтів у закладі» – даний підпроцес спрямований на обслуговування клієнтів, подачі готової страви чи отримання нового замовлення;
- «Здійснення фінансових операцій» – даний підпроцес спрямований на підтвердження оплати, виплати податків та створення фінансової звітності.

Одним із недоліків бізнес-процесу «Діяльність Суші-маркету» є відсутність послуги доставки готових страв клієнтам. Поточна схема включає етапи прийому та обробки замовлень, приготування страв, обслуговування клієнтів у закладі та проведення фінансових операцій, але не охоплює можливість доставки замовлень безпосередньо до клієнтів (див. Рис. 2, а).

Ключовим елементом у процесі реінжинірингу діяльності суші-маркету (див. Рис. 2, б) є нова підфункція «Доставка замовлень», яка значно покращить швидкість та якість обслуговування клієнтів, які замовляють доставку. Дана підфункція відповідає за управління всім процесом доставки: від отримання готового замовлення на кухні до його передачі кур'єру та доставки кінцевому клієнту. Крім того, основним нововведенням є інтеграція автоматизованих повідомлень для інформування кур'єрів про готовність замовлення. В результаті отримуємо зменшення затримки в комунікації між кухнею та службою доставки, завдяки швидкому отриманню інформації кур'єром про готові замовлення. Також функція «Доставка замовлень» враховує пріоритетність

замовлень, що допомагає організувати оптимальний маршрут для кур'єра та своєчасно доставити замовлення.

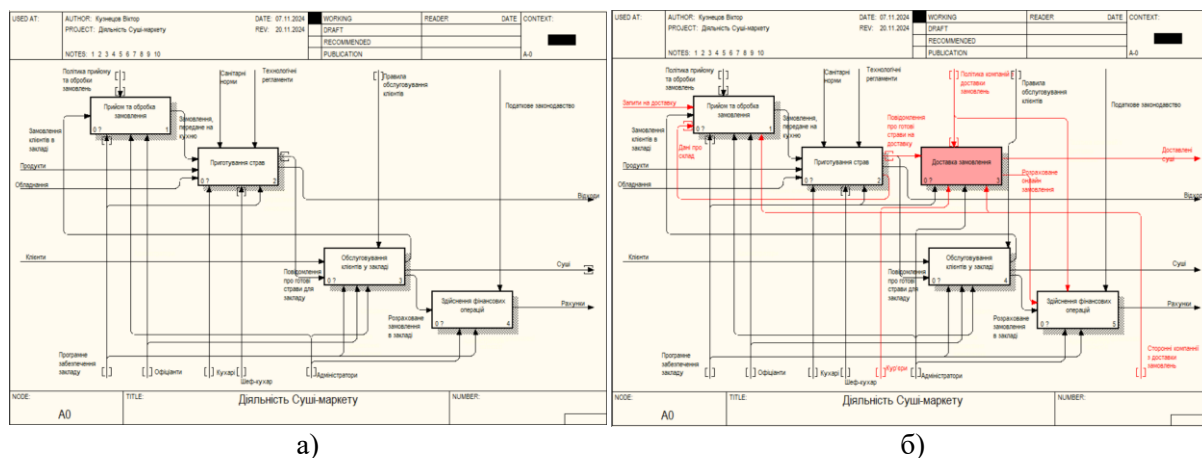


Рис. 2 – Функціональна діаграма «Діяльність Суші-маркету» AS-IS (a) та TO-BE (б)

Підпроцес «Прийом замовлень від клієнтів» AS-IS проілюстровано діаграмою IDEF3 (Рис. 3, а). Замовлення клієнтів в закладі надходить до адміністратора, який вносить дані (блок 6), який в свою чергу вносить дані про назву страви (блок 3), кількість (блок 4) та інформацію про додаткову інформацію (блок 5).

На Рис. 3, б) наведена IDEF3 діаграма «Прийом замовлень від клієнтів» TO-BE після реінжинірингу. На даній діаграмі зображено процес «Прийом замовлення від клієнтів», зокрема, додано нову підфункцію «Прийняття замовлення через мобільний додаток компаній по доставці», виділену світло-червоним кольором. Дане нововведення є важливою частиною реінжинірингу, спрямованого на покращення зручності та швидкості обробки замовлень для клієнтів, які користуються послугами доставки.

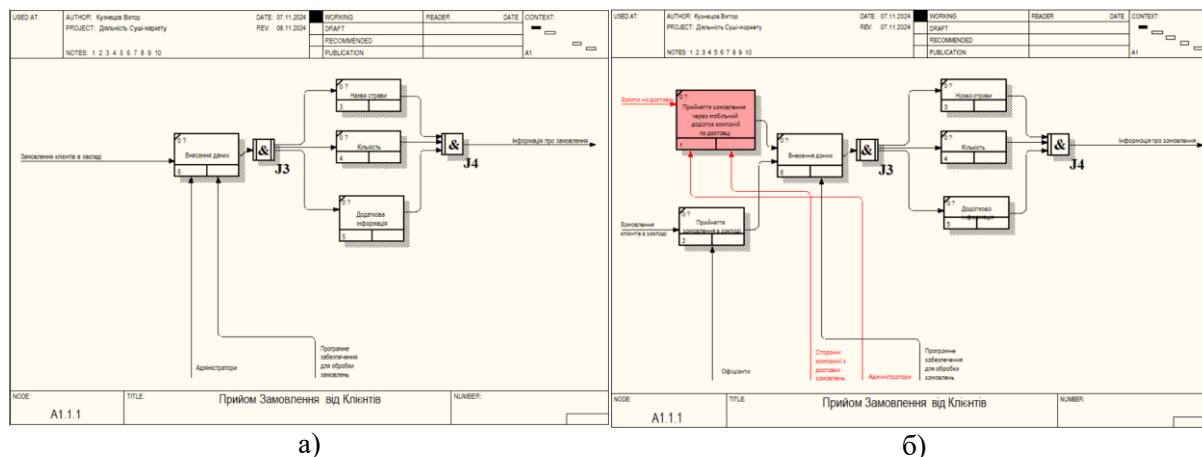


Рис. 3 – Діаграма IDEF3 «Прийом замовлень від клієнтів» AS-IS (a) та TO-BE (б)

Завдяки наведеній підфункції замовлення можуть надходити безпосередньо з мобільного додатку партнерської компанії з доставки, що значно розширює можливості прийому замовлень поза межами закладу. Такий підхід автоматизує процес, дозволяючи клієнтам самостійно оформляти замовлення через мобільний додаток, який синхронізується із системою суші-маркету, зменшує навантаження на персонал, оскільки замовлення відразу потрапляє до системи та обробляється згідно з визначеними стандартами. Після надходження замовлення дані автоматично передаються на етап внесення даних, де фіксуються назва страв, кількість і додаткові побажання клієнта. Завдяки даному процесу інформація про замовлення стає доступною для подальших

етапів обробки, забезпечуючи точність і оперативність. Інтеграція з мобільними додатками компаній з доставки дозволяє оптимізувати процес прийому замовлень і робить сервіс зручнішим для клієнтів, які замовляють через онлайн-платформи.

Висновки

В рамках роботи було проведено комплексний аналіз та реінжиніринг бізнес-процесів суши-маркету за допомогою застосування методології IDEF0 та IDEF3, які дозволили детально змодельовати існуючі та розробити нові процеси, забезпечити їхню інтеграцію та оптимізацію. Впровадження запропонованих змін призвело до суттєвого покращення ефективності роботи підприємства, зокрема, збільшення обсягу продажів, підвищення якості обслуговування та зниження витрат. Результати проведеного дослідження свідчать про те, що реінжиніринг бізнес-процесів є ефективним інструментом для підвищення конкурентоспроможності підприємств у сфері громадського харчування. Запропоновані в роботі рішення можуть бути використані іншими компаніями для оптимізації своїх бізнес-процесів та підвищення задоволеності клієнтів. Крім того, дослідження підкреслює важливість використання сучасних інформаційних технологій для автоматизації бізнес-процесів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Перелік використаних джерел:

1. Sushi Restaurants Market Size, Growth & Industry Statistics By 2030. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-sushi-restaurants-market> (дата звернення: 10.09.2024).
2. Sushi Restaurants Market Demand and Growth Insights 2023. URL: <https://www.usdanalytics.com/> (дата звернення: 12.09.2024).
3. Sushi Restaurants Market to Grow by USD 2.49 Billion. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/sushi-restaurants-market> (дата звернення: 12.09.2024).
4. Dagher J., Fayad L. Business Process Reengineering: A Crucial Approach for Enhanced Organizational Sustainability. *Navigating the Intersection of Business, Sustainability and Technology* / by ed. El-Chaarani H. et al. 2024. Pp. 25-59. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-8572-2_2.
5. Restaurant Positions and Their Roles Explained. URL: <https://getsling.com/blog/restaurant-positions/> (дата звернення: 07.10.2024).
6. Use of Online Food Delivery Services to Order Food Prepared Away-From-Home and Associated Sociodemographic Characteristics: A Cross-Sectional, Multi-Country Analysis / M. Keeble et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17(14). Article 5190. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17145190>.
7. Chandrasekhar N., Gupta S., Nanda N. Food Delivery Services and Customer Preference: A Comparative Analysis. *Journal of Foodservice Business Research*. 2019. Vol. 22(10). Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1080/15378020.2019.1626208>.
8. Last-mile delivery for consumer driven logistics / A. Galkin et al. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 39. Pp. 74-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.009>.

References:

1. Sushi Restaurants Market Size, Growth & Industry Statistics By 2030. [Online]. Available: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-sushi-restaurants-market>. Accessed on: September 10, 2024.
2. Sushi Restaurants Market Demand and Growth Insights 2023. [Online]. Available: <https://www.usdanalytics.com/>. Accessed on: September 12, 2024.
3. Sushi Restaurants Market to Grow by USD 2.49 Billion. [Online]. Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/sushi-restaurants-market>. Accessed on: September 12, 2024.
4. J. Dagher, and L. Fayad, «Business Process Reengineering: A Crucial Approach for Enhanced Organizational Sustainability», in *Navigating the Intersection of Business, Sustainability and Technology*, H. El-Chaarani et al., Eds., 2024, pp. 25-59. doi: 10.1007/978-981-99-8572-2_2.
5. Restaurant Positions and Their Roles Explained. [Online]. Available: <https://getsling.com/blog/restaurant-positions/>. Accessed on: October 07, 2024.
6. M. Keeble et al. «Use of Online Food Delivery Services to Order Food Prepared Away-From-Home and Associated Sociodemographic Characteristics: A Cross-Sectional, Multi-Country Analysis»,

- International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17(14), article 5190, 2020. doi: 10.3390/ijerph17145190.
7. N. Chandrasekhar, S. Gupta, and N. Nanda, «Food Delivery Services and Customer Preference: A Comparative Analysis», *Journal of Foodservice Business Research*, vol. 22(10), pp. 1-12, 2019. doi: 10.1080/15378020.2019.1626208.
8. A. Galkin, L. Obolentseva, I. Balandina, E. Kush, V. Karpenko, and P. Bajdor, «Last-mile delivery for consumer driven logistics», *Transportation Research Procedia*, vol. 39, pp. 74-83, 2019. doi: 10.1016/j.trpro.2019.06.009.

Стаття надійшла 21.10.2024

Стаття прийнята 13.11.2024

УДК 004.442:698

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321222

© Сергієнко А.В.¹, Балалаєва О.Ю.², Іванов Д.В.³, Вус І.В.⁴

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ ЗАМОВЛЕННЯ НАТЯЖНИХ СТЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕРЕЛЯЦІЙНОЇ БАЗИ ДАНИХ MONGODB

У статті розглянуто питання оптимізації методики розрахунку вартості замовлення натяжних стель, яка б враховувала криволінійну форму стелі, наявність додаткових кутів та додаткових елементів, таких як точки освітлення, системи кондиціонування та вентиляції, підсвітка та різноманітне декоративне оздоблення. Аналіз веб та мобільних застосунків показав обмеженість розробок для обрахунку площі та вартості натяжних стель. Авторами розроблено мобільний додаток для обробки замовлень натяжних стель, який дозволяє створювати креслення довільної форми з можливістю зазначення додаткових кутів на кресленні стелі, візуалізації розташування люстр, світильників, треків, карнизів і підсвітки, автоматизувати розрахунки необхідних матеріалів за визначеною площею натяжної стелі. Створений програмний застосунок також надає можливість зберігати профілі замовників, а також повну інформацію про заплановані та зараховані замовлення та формувати звіти з виконаних робіт. У роботі проведено порівняльний аналіз засобів розробки мобільних прикладень та доведено переваги нереляційної бази даних MongoDB у порівнянні з реляційною базою даних MySQL при створенні даного додатку, для чого було побудовано ER-діаграми для обох варіантів. Обґрунтовано доцільність вибору фреймворку Ionic Framework та мови програмування TypeScript для розробки клієнтської частини, а також NodeJS та мови програмування JavaScript для серверної частини. Для оцінки ефективності розробленого мобільного додатку проаналізовано такі показники, як кількість завантажень, кількість реєстрацій, залучення користувачів, середня тривалість сесії, коефіцієнт утримання клієнтів, віральність, показник відтоку клієнтів, метрики для вимірювання монетизації (ARPU та ARPA), вартість залучення одного користувача, довічна цінність клієнта (LTV), ціна ефективної установки, окупність рекламних вкладень тощо. Для надання оцінки була застосована платформа Flurry, яка використовується для збору та аналізу

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaeva_e_u@pstu.edu

³ асистент, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8660-0928, ivanov.d.v@nmu.one

⁴ магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, vus_i_v@pstu.edu

статистики мобільного додатку. Результати аналізу показали затребуваність розробленого додатку, а саме збільшення середнього терміну сеансу в два рази за три місяці, при цьому для збільшення кількості активних користувачів необхідність приділити увагу питанню просування даної розробки.

Ключові слова: мобільний додаток, замовлення, натяжна стеля, MongoDB, Ionic, TypeScript, JavaScript, оцінка ефективності.

A. Serhiienko, O. Balalaieva, D. Ivanov, I. Vus. Development of the mobile application and optimization of the calculation method of the ordering cost of the stretch ceilings using NoSQL Database MongoDB. The article considers the issue of optimizing the method of calculating the cost of ordering stretch ceilings, which would take into account the curved shape of the ceiling, the presence of additional corners and additional elements, such as lighting points, air conditioning and ventilation systems, backlighting and various decorative finishes. Analysis of web and mobile applications showed the limitations of developments for calculating the area and cost of stretch ceilings. The authors have developed a mobile application for processing orders for stretch ceilings, which allows you to create drawings of any shape with the ability to indicate additional corners on the ceiling drawing, visualize the location of chandeliers, lamps, tracks, cornices and backlighting, automate calculations of the necessary materials for a specified area of the stretch ceiling. The created software application also provides the ability to store customer profiles, as well as complete information about planned and credited orders and generate reports on the work performed. The paper conducted a comparative analysis of mobile application development tools and proved the advantages of the non-relational database MongoDB compared to the relational database MySQL when creating this application, for which ER diagrams were built for both options. The feasibility of choosing the Ionic Framework and the TypeScript programming language for developing the client part, as well as NodeJS and the JavaScript programming language for the server part, was substantiated. To assess the effectiveness of the developed mobile application, such indicators as the number of downloads, the number of registrations, user engagement, average session duration, customer retention rate, virality, customer churn rate, metrics for measuring monetization (ARPU and ARPA), the cost of attracting one user, customer lifetime value (LTV), the price of an effective installation, the return on advertising investments, etc. were analyzed. The Flurry platform was used to provide an assessment, which is used to collect and analyze mobile application statistics. The results of the analysis showed the demand for the developed application, namely the increase in the average session duration by two times in three months, while in order to increase the number of active users, it is necessary to pay attention to the issue of promoting this development.

Keywords: mobile app, order, stretch ceiling, MongoDB, Ionic, TypeScript, JavaScript, performance evaluation.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день натяжні стелі залишаються популярним вибором при створенні сучасних інтер'єрів житлових та комерційних приміщень, що обумовлено практичністю універсальності та естетичністю такого дизайнерського рішення [1]. Даний варіант оздоблення стелі характеризується широкою палітрою кольорів та фактур, можливістю використання фотодруку, імітації різних текстур, варіантів глянцевого, матового або сатинового покриття, використання додаткової підсвітки тощо. Конструкції натяжних стель характеризуються швидким монтажем, надійністю та довговічністю за рахунок водонепроникності та стійкості до пожеж, а використання спеціальних підкладок забезпечує додаткову звукоізоляцію [2] та теплоізоляцію. Однією з головних переваг натяжних стель є маскуванню таких недоліків, як нерівність стелі будівлі, наявність тріщин або елементів, які треба приховати (наприклад, проводка або вентиляційна система).

Зважаючи на те, що натяжні стелі найчастіше використовують за наявності нерівних стель та кутів приміщення, розрахунок площі та, відповідно, вартості таких конструкцій ускладнюється. Також при обрахунку треба враховувати наявність ніш, виступів, балок, труб, вентиляційних шахт тощо. Крім того, основна стеля може мати криволінійну геометрію через наявність арок

або заокруглених стін. При обчисленні важливо також врахувати кількість та розташування отворів для світильників або люстр, систем кондиціонування або вентиляції. Окрім цього, додавання підсвітки та окремих декоративних елементів може впливати на загальну площу натяжної стелі. Навіть матеріал полотна впливає на остаточний результат розрахунку, адже необхідно враховувати коефіцієнт розтяжності, що особливо критично для ПВХ-матеріалів. Сучасне програмне забезпечення дозволяє точно змодельовати приміщення для більш точного розрахунку площі поверхні стелі. Однак аналіз веб та мобільних застосунків показав обмеженість розробок для обрахунку площі та вартості саме натяжних стель.

Актуальність дослідження полягає у вузькій спеціалізації мобільного додатку для задачі обрахування натяжних стель різних специфікацій, адже універсального рішення, яке б враховувало усі вищезазначені ускладнюючі фактори, наразі не запропоновано для україномовного користувача. Існуючі додатки або недостатньо забезпечені необхідним функціоналом, або, навпаки, мають переобтяжений інтерфейс, що призводить до втрати часу на виконання розрахунків.

Метою даної роботи є оптимізація методики обробки замовлень натяжних стель та підбір оптимальних параметрів для розробки мобільного додатку для розрахунку площі натяжної стелі й вартості замовлення, а також дослідження ефективності впровадження власної розробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сайтів з продажу натяжних стель показав, що частина з них пропонує власні калькулятори для обчислення вартості такого замовлення. Наприклад, така можливість наявна на вебсторінці компанії Potolkoff, що пропонує свої послуги з встановлення натяжних стель та супутні матеріали [3]. Запропонований калькулятор дозволяє задавати розміри стелі (довжину та ширину), за якими відображає периметр та площу, обирати матеріали, маскувальну вставку та профіль, а також зазначити додаткові елементи складності, такі як кількість кутів, кріплення світильника, кріплення люстри, криволінійні ділянки, центрування шва. У результаті користувач отримує загальну вартість натяжної стелі за цінами даної компанії.

Аналогічний сервіс пропонує вебсторінка фірми «Гарпун» [4], яка також спеціалізується на натяжних стелях. Користувачу необхідно зазначити площу стелі, а також обрати матеріал полотна та його фактуру. Функціонал даного калькулятора дещо спрощений у порівнянні з попереднім. Дане прикладення не дозволяє обрати довільну форму стелі, а також зазначати освітлення та інші додаткові особливості замовлення. Спрощений варіант калькулятора надає й вебсторінка фірми «Mirem» [5], де для розрахунку можна задати площу та периметр стелі, кількість точок освітлення та кутів, але не можна обрати матеріал натяжної стелі для більш точного розрахунку, бо його вартість закладена автоматично.

Найбільш розширений функціонал з україномовних сервісів демонструє калькулятор на сайті фірми «Elit-Steli» [6]. На вебсторінці одразу зазначено, що ціна на натяжні стелі залежить від таких факторів, як виробник полотна, площа стелі (фіксована ціна до певної площі), ширина полотна, вид матеріалу (ПВХ чи тканинне полотно), вид профілів (алюмінієвий, ПВХ, парящий тіньовий тощо), складність конструкцій, наявність труб, додаткові кути й додаткові роботи (встановлення світильників, люстр, трекових систем, вентиляційних решіток, карнизів тощо). Для розрахунку користувач задає наступні дані: 1) розмір стелі – довжина, ширина, площа; 2) матеріали – вид матеріалу, вставка маскувальна, профіль, додатковий профіль, безщільова система; 3) додаткові елементи – додаткові кути, криволінійні ділянки, закладна під шафу, установка LED стрічки, установка блоку живлення, монтаж по плитці (кераміка або керамограніт), платформа під світильник або люстру, установка світильника або люстру, обхід люка, обвід труб (газова або опалення), обхід кондиціонера, закладна або ніша під карниз, прихований під карниз.

Виклад основного матеріалу. Аналітичний огляд існуючих мобільних та вебдодатків дозволив визначити наступний функціонал для розробки власного мобільного прикладення для обробки замовлень натяжних стель:

- збереження базової інформації про замовника;
- створення креслення довільної форми для автоматизації розрахунку площі стелі;
- можливість додавання на креслення стелі додаткових кутів;
- можливість додавання на креслення стелі точок освітлення (люстра, світильник), треків, карнизів, підсвітки;
- розрахунок вартості замовлення натяжної стелі відповідно до створеного креслення;

- можливість додавання приміток за замовленням;
- створення звітів з виконаних робіт;
- планування майбутніх замовлень та архівування минулих;
- реєстрація та створення профілю користувача.

Для опису функціональних можливостей мобільного додатку на концептуальному рівні побудовано діаграму прецедентів, яка наведена на рис. 1.

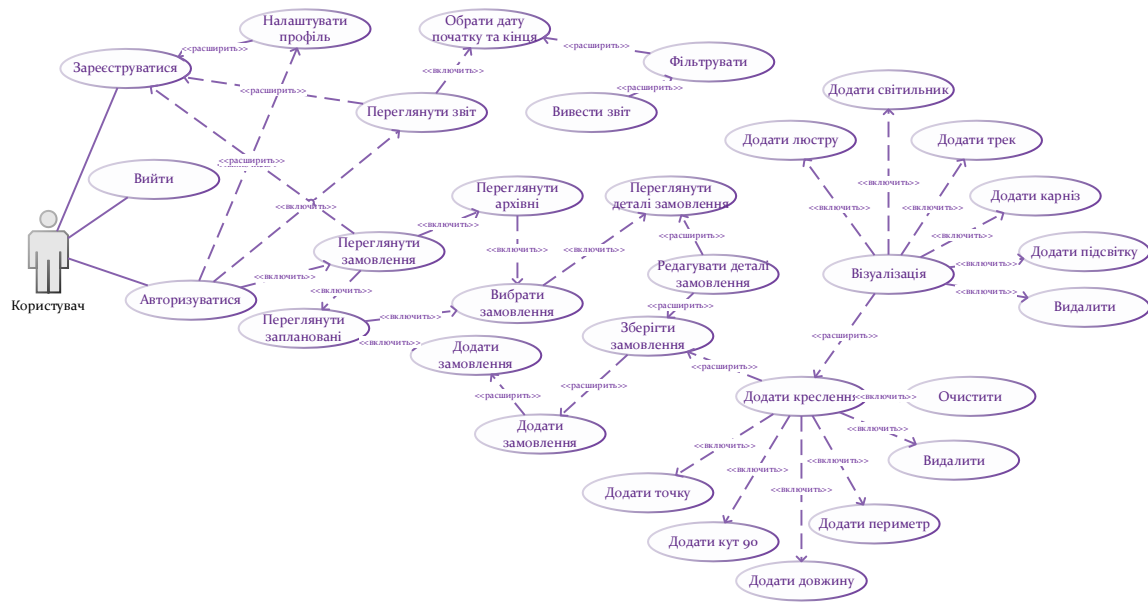


Рис. 1 – Діаграма прецедентів

При розробці даного мобільного додатку було використано гібридну архітектуру кросплатформного прикладення [7]. Відповідно до обраної архітектури презентаційний шар має веб-орієнтоване представлення і побудований за допомогою вебтехнологій, таких як HTML, CSS і JavaScript, який працює на рушії рендерингу. Розробники програмного забезпечення використовують PhoneGap, Apache Cordova або Ionic Capacitor, які взаємодіють з нативною частиною через виклики API.

Для розробки мобільного додатку з обрахування натяжних стель найбільш доцільно обирати між двома фреймворками – Flutter і Ionic [8], основна різниця між якими полягає в тому, що у Flutter закрита екосистема з власними стандартами, а Ionic створений за допомогою загальнодоступних вебтехнологій відповідно до загальновідомих вебстандартів. Обидва фреймворки – це кросплатформні технології, тому один і той самий код, написаний на Ionic або Flutter, підходить як для мобільної, так і для вебверсії. Вважається, що Flutter є більш підходящим інструментом для швидкої розробки мінімально життєздатного продукту (MVP) [9]. З іншого боку, до недавнього часу у Flutter були ряд обмежень, що стосуються розгортання застосунків в інтернеті. І хоча в останніх версіях Google виправив цей недолік, для вебзастосунків найчастіше використовують більш звичний Ionic. Оскільки очевидного переможця серед цих двох технологій немає, то для написання клієнтської частини мобільного додатку було обрано фреймворк Ionic Framework та мова програмування TypeScript, а для серверної частини – NodeJS та мова програмування JavaScript.

При виборі системи управління базами даних (СУБД) обирали між двома найпопулярнішими варіантами – MySQL і MongoDB. Обидві СУБД мають спільні позитивні риси: пропонують індексацію для оптимізації продуктивності запитів, мають інтерфейси для зручного управління даними, забезпечують високий рівень безпеки через аутентифікацію, контроль доступу та шифрування, мають активні спільноти й офіційну документацію. Прийняття рішення на користь MySQL або MongoDB залежить від характеру даних і вимог проєкту [10].

MySQL є реляційною СУБД із відкритим вихідним кодом, яка широко використовується для створення вебдодатків. Широке розповсюдження даної СУБД обумовлено простотою

використання, наявністю великої кількості посібників, плагінів та розширень для полегшення роботи, сумісністю з багатьма мовами програмування (Java, Python, PHP, Node.js тощо), підтримкою реляційної моделі збереження даних у таблицях із використанням первинних і зовнішніх ключів, а також сумісністю з ACID, що забезпечує надійність транзакцій. В якості недоліків MySQL слід зазначити, що вертикальна масштабованість обмежена ресурсами сервера, а реплікація – п'ятьма копіями бази, при цьому для даної СУБД характерна менша продуктивність для великих обсягів даних, які постійно змінюються.

MongoDB – нереляційна (NoSQL) документно-орієнтована СУБД, яка використовує BSON (бінарний формат JSON) для збереження структурованих, напівструктурованих і неструктурованих даних. Основною перевагою даної СУБД є гнучка структура, що дозволяє працювати без попередньо визначеної схеми. MongoDB не має обмежень, наявних для MySQL: для неї характерна підтримка горизонтального масштабування завдяки сегментації та наборам реплік, висока продуктивність запису через API insertMany(), підтримка динамічної роботи з великими обсягами даних, а також використання інструментів для агрегації даних, таких як \$lookup і конвеєр агрегації. MongoDB оптимально підходить для використання при роботі з соціальними мережами, медіа або IoT-додатками, а також при обробці даних, що постійно оновлюються й розширюються.

Отже, MySQL доцільно використовувати для структурованих даних і складних транзакцій, а MongoDB є оптимальним вибором для роботи з гнучкими, змінними даними й масштабованими додатками.

Для вибору однієї в двох вищезазначених СУБД в рамках розробки прикладення для обробки замовлень натяжних стель було спроектовано ER-діаграми для MySQL та MongoDB (рис. 2).

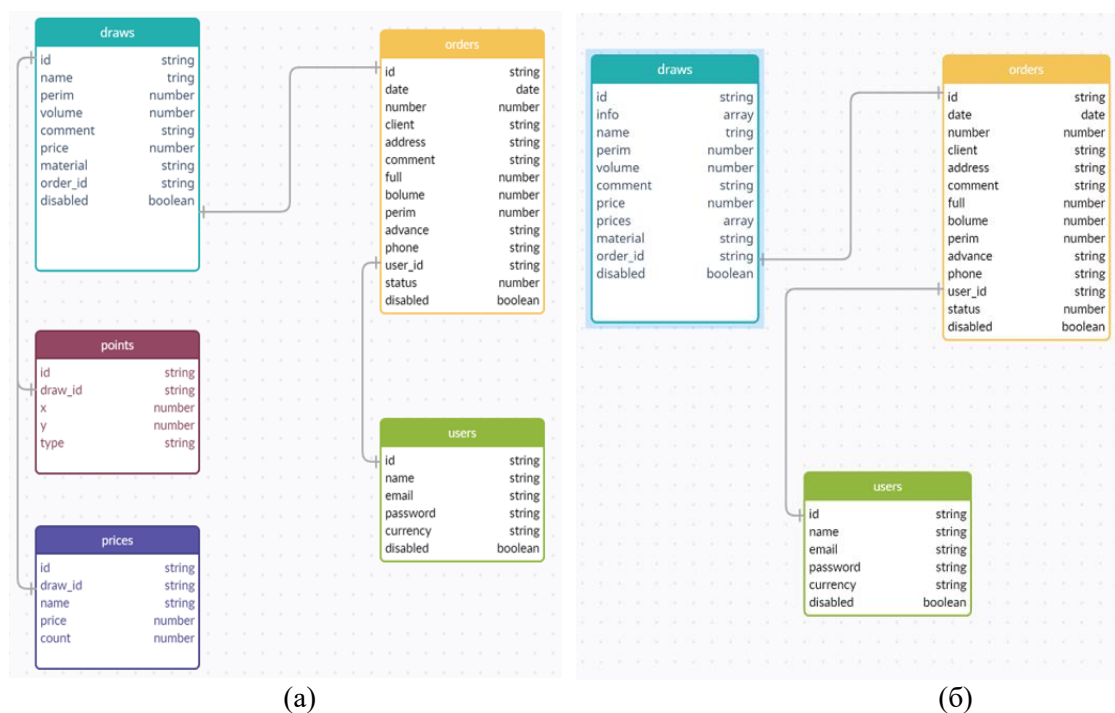


Рис. 2 – Схема даних при використанні СУБД MySQL (a) та MongoDB (б)

Таким чином, наведені вище ER-діаграми продемонстрували, що використання MongoDB робить простішою взаємодію із базою даних запропонованого програмного прикладення.

Розглянемо основний функціонал розробленого мобільного додатку. Головна панель містить три основні пункти: «Замовлення», «Звіт» та «Профіль». У налаштуванні профілю розташовані логін користувача, електронна пошта, валюта для розрахунку та пароль (рис. 3а). Пункт «Замовлення» дозволяє відображати дві категорії – заплановані (рис. 3б) та архівні замовлення (рис. 3в).

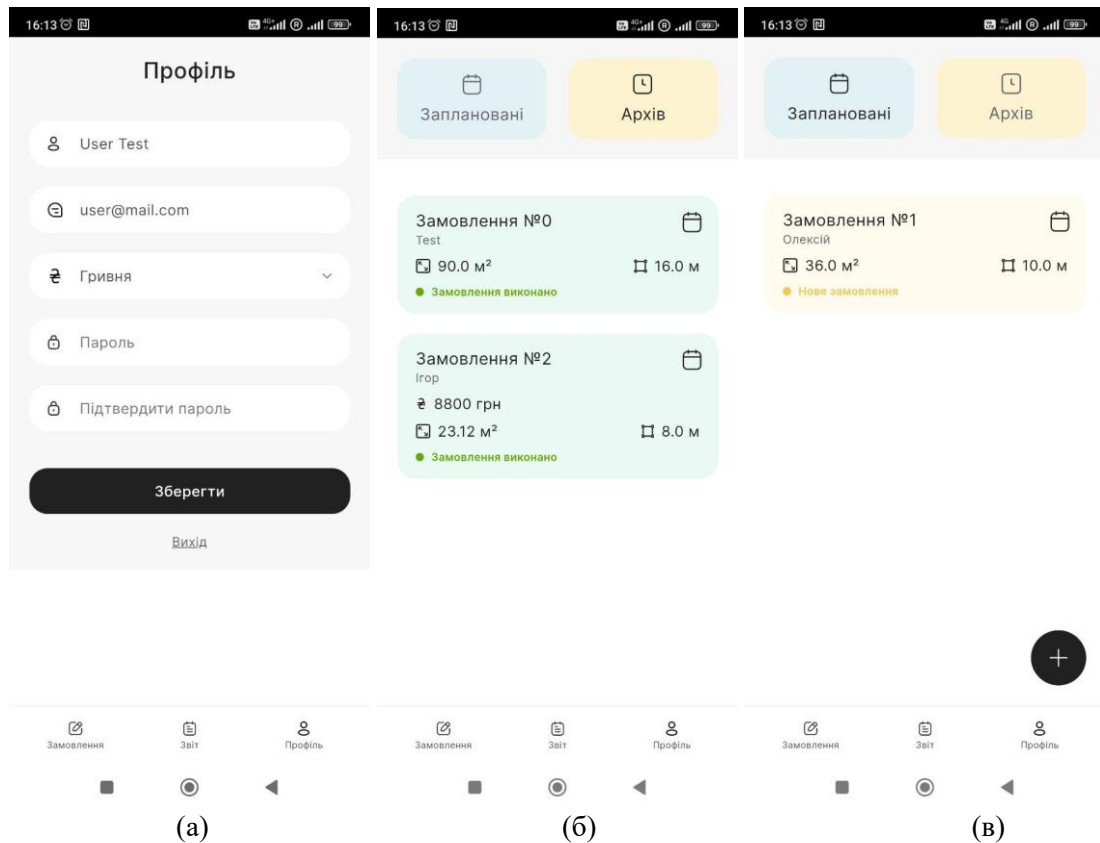


Рис. 3 – Інтерфейс додатку в режимі редагування профілю (а), відображення переліку запланованих замовлень (б) та архівних замовлень (в)

Кожний запис можна створювати (рис. 4а), редагувати та видаляти, при цьому збережену інформацію можна переглядати (рис. 4б) та редагувати.

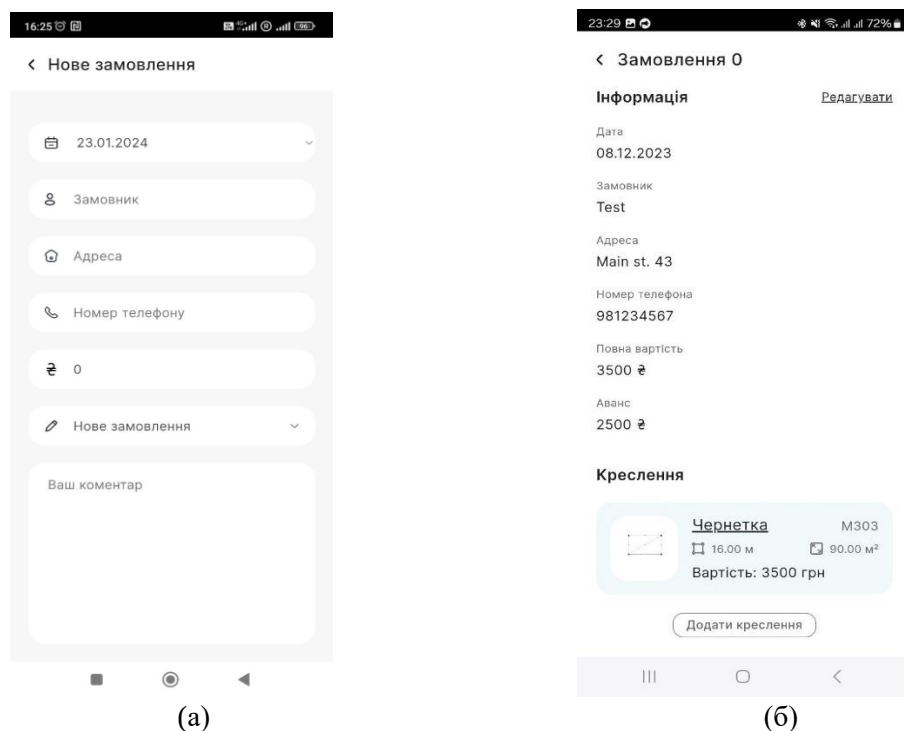


Рис. 4 – Створення нового замовлення (а) та перегляд інформації про замовлення (б)

Окремої уваги заслуговує процес створення креслення, яке можна додати до замовлення після збереження загальної інформації. Для цього потрібно натиснути кнопку «Додати креслення», а потім додати необхідні об'єкти: точки, кути, задати довжину та обрахувати периметр. Приклад такого креслення наведено на рис. 5а. Після внесення креслення можна створити додаткову візуалізацію, додавши розташування елементів з переліку «Точки»: люстр, світильників, треків, карнизів та підсвітки, як це показано на рис. 5б.

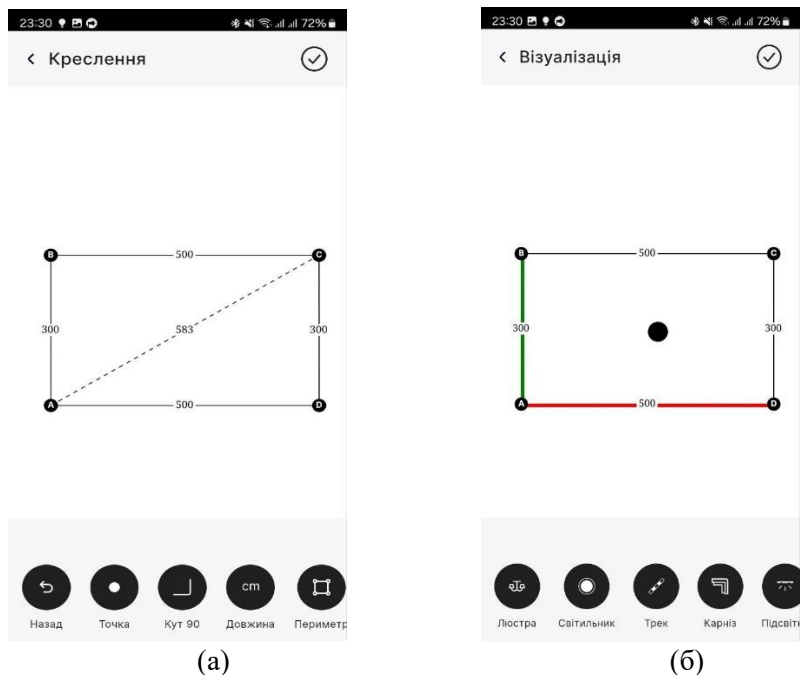


Рис. 5 – Створення креслення (а) та візуалізації з використанням додаткових елементів (б)

Після збереження відображається повна збережена інформація про креслення (рис. 6).

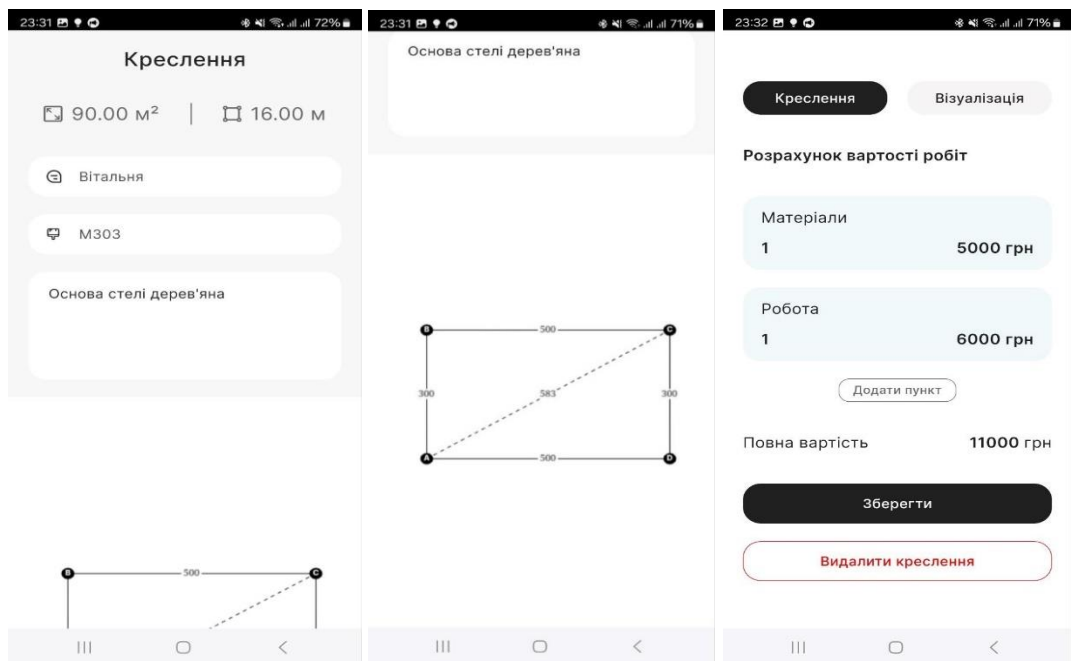


Рис. 6 – Інформація про креслення

Пункти, за якими проводиться розрахунок вартості натяжної стелі, можна редагувати, як це показано на рис. 7а. Пункт меню «Звіт» дозволяє переглянути звіти по усіх заявках, що були створені в додатку за заданий період (рис. 7б).

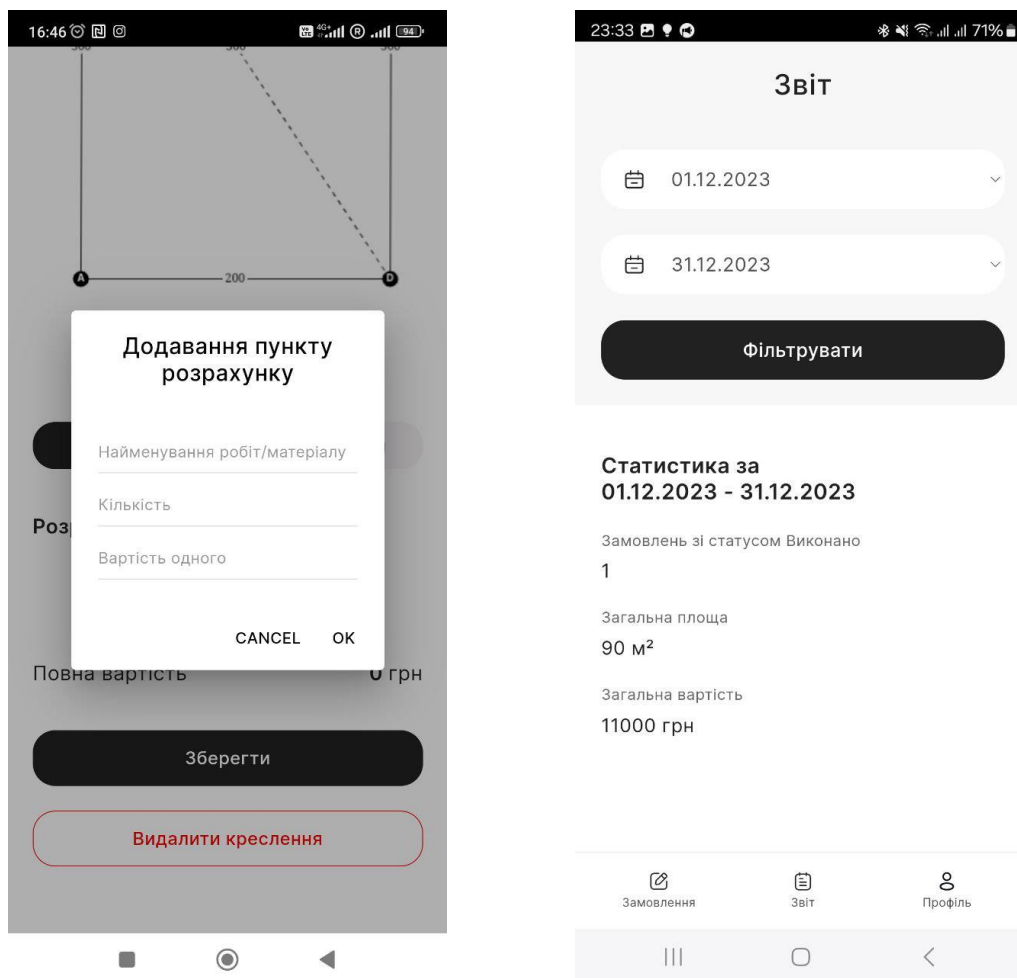


Рис. 7 – Додавання пункту розрахунку (а) і звіт про виконання замовлень за заданий період (б)

Для оцінки ефективності розробленого мобільного додатку було проаналізовано наступні показники: кількість завантажень, кількість реєстрацій, залучення користувачів, середня тривалість сесії, коефіцієнт утримання клієнтів, віральність, показник відтоку клієнтів, метрики для вимірювання монетизації, а саме ARPU (Average revenue per user) та ARPA (Average Revenue per Account), вартість залучення одного користувача, довічна цінність клієнта (LTV), ціна ефективної установки, окупність рекламних вкладень тощо [11].

Для надання оцінки вищезазначених параметрів застосовували платформу Flurry, яка використовується для збору та аналізу статистики мобільного додатку. Цей сервіс є безкоштовним, підтримує платформи iOS, Android, BlackBerry, а для відстеження монетизації програми необхідно підключити PayPal. Платформа Flurry має наступний функціонал: відстеження виводу продажів, відстеження до 5 додатків одночасно, робота із сегментами аудиторії, відстеження даних користувачів (основні показники, інтереси, демографічні дані тощо), аналітика мобільних ігор, налаштування звітів, а також відстеження монетизації.

Аналіз ефективності роботи додатку було проведено на невеликому проміжку часу, що дозволяє зробити тільки загальні висновки про наявні тенденції. Оцінювали такі показники, як кількість встановлень, кількість видалень, кількість активних користувачів та середній термін сесансу (хв.). Результати оцінки зазначених параметрів наведені на рис. 8-11.



Рис. 8 – Кількість встановлень додатку



Рис. 9 – Кількість видалень додатку



Рис. 10 – Кількість активних користувачів



Рис. 11 – Середній термін сеансу

Кількість завантажень (рис. 8) хоча й не відображає ефективності саме роботи додатку, але демонструє якість просування додатку. Отримані результати показують невелику кількість користувачів та необхідність додаткового просування розробленого програмного продукту.

Метрика ASL (Average Session Length, або середня тривалість сесії) – кількість годин, що проведено користувачем в мобільному додатку, дозволяє відслідковувати аудиторію, на яку необхідно зробити акцент. Дана метрика розраховується як відношення сумарної тривалості сесій до загальної кількості сесій. Отримані результати, наведені на рис. 11, показують, що в середині розглянутого періоду часу (за місяць використання) середній термін сеансу суттєво збільшився, а саме в 2 рази. Цей факт дає право стверджувати, що створений додаток для обробки замовлень натяжних стель є корисним та працює ефективно. У майбутньому більш уваги потрібно приділити його просуванню, що дозволить збільшити кількість користувачів та поступово впроваджувати новий функціонал.

Висновки

Таким чином, розроблено мобільний додаток для обробки замовлень натяжних стель на основі оптимізованої методики, а також проведено аналіз ефективності впровадження даного прикладення.

Розроблений програмний застосунок дозволяє:

- створювати креслення довільної форми з можливістю зазначення додаткові кутів на кресленні стелі, візуалізації розташування люстр, світильників, треків, карнизів і підсвітки, автоматизувати розрахунки необхідних матеріалів за визначеною площею натяжної стелі;
- зберігати профілі замовників, а також повну інформацію про заплановані та заархівовані замовлення;
- формувати звіти з виконаних робіт.

У роботі обґрунтовано доцільність використовувати нереляційної бази даних MongoDB, фреймворку Ionic Framework та мови програмування TypeScript для клієнтської частини, а також NodeJS та мовипрограмування JavaScript для серверної частини.

Оцінка показників ефективності мобільного застосунку показала затребуваність розробленого додатку, а саме збільшення середнього терміну сеансу в два рази за три місяці, при цьому для збільшення кількості активних користувачів необхідність приділити увагу питанню просування даної розробки.

Перелік використаних джерел:

1. The characteristic design of ceiling / F. P. Makalew et al. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 2024. Vol. 11(02). Pp. 103-112. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.11.2.0079>.
2. Nocke C., Hilge C. Microperforated stretched ceilings basics and applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2004. Vol. 115. Article 2436. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4781635>.
3. Potolkoff. Натяжні стелі: Виготовлення, монтаж, сервіс. Калькулятор вартості натяжних стель. URL: <https://potolkoff.kiev.ua/uk/calculator-2> (дата звернення: 03.08.2024).
4. Гарпун. Натяжні стелі Калькулятор натяжних стель. URL: <https://harpoon.com.ua/uk/natya-zhni-steli/kalkulyator> (дата звернення: 01.08.2024).
5. Mirem. Натяжні стелі в Києві та області. Онлайн-калькулятор натяжних стель. URL: <https://www.mirem.com.ua/tsena#online-calculator> (дата звернення: 01.08.2024).
6. Elit-Steli. Калькулятор. Ціноутворення натяжної стелі. URL: <https://elit-steli.kyiv.ua/ua/calculator> (дата звернення: 14.08.2024).
7. Singh M., Shobha G. Comparative Analysis of Hybrid Mobile App Development Frameworks. *International Journal of Soft Computing and Engineering*. 2021. Vol. 10. Iss. 6. Pp. 21-26. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijsc.F3518.0710621>.
8. The rise of mobile development: a comparison between Ionic and Flutter / O. C. Novac et al. *ECAI : 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*, Ploiesti, Romania, 30 June - 01 July 2022. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECAI54874.2022.9847460>.
9. Analysis of Cross Platform Application Development Over Multiple Devices using Flutter & Dart / Jadaun S., Singh R. K., Kumar R., Agarwal K.K. *International Journal of Recent Technology and*

Engineering (IJRTE). 2023. Vol. 12(1). Pp. 33-38. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.A7580.0512123>.

10. A qualitative analysis of the performance of MongoDB vs MySQL database based on insertion and retrieval operations using a web/android application to explore load balancing – Sharding in MongoDB and its advantages / Patil M., Hanni A., Tejeshwar C.H., Patil P. *I-SMAC : 2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, Palladam, India, 10-11 February 2017. Pp. 325-330. DOI: <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2017.8058365>.
11. Thomas C. G., Devi A. J. A Study and Overview of the Mobile App Development Industry. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters*. 2021. Vol. 5. No. 1. Pp. 115-130. DOI: <https://doi.org/10.47992/IJAEML.2581.7000.0097>.

References:

1. F.P. Makalew, R. Rumbayan, B. Tombeg, M.Y.N. Budhyowati, and I. Musanif, «The characteristic design of ceiling», *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, vol. 11(02), pp. 103-112, 2024. doi: 10.30574/wjaets.2024.11.2.0079.
2. C. Nocke, and C. Hilge, «Microperforated stretched ceilings basics and applications», *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, article 2436, 2004. doi: 10.1121/1.4781635.
3. Potolkoff. Natiashni steli: Vyhotovlennia, montazh, servis. Kalkulator vartosti natiashnykh stel (Potolkoff. Stretch ceilings: Manufacturing, installation, service. Stretch ceiling cost calculator). [Online]. Available: <https://potolkoff.kiev.ua/uk/calculator-2>. Accessed on: August 3, 2024.
4. Harpun. Natiashni steli Kalkulator natiashnykh stel (Harpoon. Stretch ceilings Stretch ceilings calculator). [Online]. Available: <https://harpoon.com.ua/uk/natyashni-steli/kalkulyator>. Accessed on: August 1, 2024.
5. Mirem. Natiashni steli v Kyievi ta oblasti. Onlain-kalkulator natiashnykh stel (Mirem. Stretch ceilings in Kiev and the region. Online calculator for stretch ceilings). [Online]. Available: <https://www.mirem.com.ua/tsena#online-calculator>. Accessed on: August 1, 2024.
6. Elit-Steli. Kalkulator. Tsinoutvorennia natiashnoi steli (Elit-Steli. Calculator. Pricing of stretch ceilings). [Online]. Available: <https://elit-steli.kyiv.ua/ua/calculator>. Accessed on: August 14, 2024.
7. M. Singh, and G. Shobha, «Comparative Analysis of Hybrid Mobile App Development Frameworks», *International Journal of Soft Computing and Engineering*, vol. 10, iss. 6, pp. 21-26, 2021. doi: 10.35940/ijsc.F3518.0710621.
8. O.C. Novac, C.M. Novac, B. Ciora, C.E. Gordan, M.I. Gordan, and G. Bujdosó, «The rise of mobile development: a comparison between Ionic and Flutter», in Proc. 14th Int. Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-10. doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847460.
9. S. Jadaun, R.K. Singh, R. Kumar, and K.K. Agarwal, «Analysis of Cross Platform Application Development Over Multiple Devices using Flutter & Dart», *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 12(1), pp. 33-38, 2023. doi: 10.35940/ijrte.A7580.0512123.
10. M. Patil, A. Hanni, C. H. Tejeshwar, and P. Patil, «A qualitative analysis of the performance of MongoDB vs MySQL database based on insertion and retrieval operations using a web/android application to explore load balancing – Sharding in MongoDB and its advantages», in Proc. Int. Conf. on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, India, 2017, pp. 325-330. doi: 10.1109/I-SMAC.2017.8058365.
11. C. G. Thomas, and A. J. Devi, «A Study and Overview of the Mobile App Development Industry», *International Journal of Applied Engineering and Management Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 115-130, 2021. doi: 10.47992/IJAEML.2581.7000.0097.

Стаття надійшла 10.09.2024

Стаття прийнята 25.09.2024

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.822.17

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321228

© Яйчук О.О.¹, Поворотній В.В.²

КОНСТРУКЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ В СУЧАСНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Стаття має оглядовий характер і присвячена аналізу сучасних матеріалів, конструкцій та технологій змащування підшипників ковзання, які є важливим елементом машинобудування та знаходять застосування в різноманітному промисловому обладнанні, такому як турбіни, насоси, генератори та компресори. Надійність і довговічність підшипників ковзання є ключовими проблемами в сучасній промисловості, оскільки їхній вихід з ладу може призвести до зупинки всього обладнання, що спричиняє значні економічні втрати. Залежно від умов експлуатації, підшипники ковзання стикаються з проблемами зносу, високих температур, вібрацій та нестабільного режиму змащування, що вимагає застосування інноваційних матеріалів, конструкцій та методів змащування. Метою даної статті є аналіз сучасних матеріалів, які застосовуються для виготовлення підшипників ковзання, конструкцій підшипників та технологій їх змащування. Особливу увагу приділено використанню полімерних матеріалів для пар тертя, а також ефективності рідин з низькою в'язкістю для змащування, що дозволяє використовувати підшипники ковзання у специфічних та високотехнологічних агрегатах. Огляд включає результати численних досліджень, у яких розглядаються різні типи підшипників, такі як гідростатичні та гідродинамічні, з використанням води та інших рідин як змащувальних середовищ. Практична значимість цього огляду полягає в можливості подальшого використання його результатів для створення оптимальних конструкцій підшипників ковзання, придатних для застосування в складних агрегатах, де висуваються критичні вимоги до точності, надійності та ефективності роботи підшипників. Основні висновки огляду свідчать про те, що поєднання інноваційних матеріалів, таких як полімери, та передових методів змащування дозволяє значно підвищити стійкість до зносу та стабільність роботи підшипників. Крім того, перспективним є впровадження нових конструкцій підшипників з покращеною ефективністю змащування та тепловідведення, що дозволить підвищити продуктивність сучасних роторних агрегатів. Дослідження в цій сфері є важливим для розвитку більш надійних та ефективних підшипникових систем у промисловості.

Ключові слова: підшипники ковзання, гідростатичні підшипники, полімерні матеріали, турбомашини, змащення підшипників ковзання, охолодження підшипників ковзання.

O.O. Yaichuk, V.V. Povornii. Constructional features and advanced technologies of journal bearings in modern industry. The article is a review and focuses on the analysis of modern materials, designs, and lubrication technologies for plain bearings, which are essential components in mechanical engineering and are used in various industrial equipment, such as turbines, pumps, generators, and compressors. The reliability and longevity of journal bearings are critical issues in modern industry, as their failure can lead to complete equipment shutdown, causing significant economic losses. Depending on operating

¹ аспірант, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: 0009-0009-4034-4266, a.yaichuk@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: 0009-0000-9128-902X, vicktorpovar@gmail.com

conditions, journal bearings face challenges related to wear, high temperatures, vibration, and unstable lubrication, necessitating the use of innovative materials, structures, and lubrication methods. This review aims to analyse contemporary materials, bearing designs, and lubrication technologies used in the manufacture of journal bearings. Special attention is given to the use of polymer materials for friction pairs and the effectiveness of low-viscosity lubricants, which enable journal bearings to be used in specialised, high-tech equipment. The review incorporates findings from numerous studies that examine various types of bearings, such as hydrostatic and hydrodynamic, using water and other fluids as lubricants. The practical significance of this review lies in its potential to inform the development of optimised journal bearing designs suited to complex applications that demand high precision, reliability, and operational efficiency. The key findings suggest that the integration of innovative materials, such as polymers, and advanced lubrication methods can significantly enhance wear resistance and operational stability. Furthermore, the implementation of new bearing designs with improved lubrication efficiency and heat dissipation offers promising improvements for the productivity of modern rotating equipment. Research in this area is crucial for advancing more reliable and efficient bearing systems in industry.

Keywords: journal bearings, hydrostatic bearings, polymer materials, turbomachinery, journal bearing lubrication, journal bearing cooling.

Постановка проблеми. Підшипники ковзання є незамінними компонентами сучасних машин, широко використовуваних в авіаційній техніці, енергетиці, транспорті, машинобудуванні та інших промислових галузях. Їхня здатність витримувати навантаження та зменшувати тертя між рухомими частинами сприяє зниженню зносу та підвищенню ефективності роботи техніки. Проблеми зносу, перегріву та нестабільного режиму змащування часто призводять до виходу з ладу підшипників, що спричиняє значні економічні втрати. Тому дослідження, спрямовані на розробку матеріалів та технологій, які підвищують довговічність та надійність підшипників ковзання, є вкрай актуальними і мають як наукове, так і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження зосереджуються на розробці інноваційних матеріалів, таких як полімери з графітовими і карбоновими добавками, а також на впровадженні нових технологій змащування. У роботах [1-17] аналізуються різні композиційні матеріали, які забезпечують високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя в умовах високих навантажень. Додатково досліджується застосування рідин з низькою в'язкістю у роботах [3, 5, 9] та сегментні конструкції підшипників у роботах [4, 8], що дозволяють значно покращити їх експлуатаційні показники та стабільність обертання.

Мета дослідження – оцінити сучасні матеріали, конструкційні рішення та інноваційні методи змащування, які здатні підвищити надійність, зносостійкість та тривалість служби підшипників ковзання за умов високих навантажень, температур і нестабільного змащення.

Виклад основного матеріалу. Підшипники ковзання є невід'ємною частиною багатьох інженерних систем, які використовуються в різних галузях, таких як авіаційна техніка, ракетобудування, енергетика, транспорт, суднобудування і машинобудування. Вони використовуються для зниження тертя і зносу між рухомими частинами, забезпечуючи плавне і стабільне обертання валів або інших обертових елементів. Сучасні технології створення підшипників ковзання передбачають використання передових матеріалів і покриттів, таких як полімери, композиційні матеріали та спеціальні метали, які забезпечують підвищену стійкість до тертя і зносу [1].

Забезпечення надійності та довговічності підшипників ковзання є однією з ключових проблем сучасної інженерії. Постійні зусилля спрямовані на підвищення продуктивності підшипників шляхом оптимізації їхніх геометричних параметрів, застосування нових методів змащування, а також використання передових комп'ютерних методів для моделювання робочих характеристик підшипників [2]. Під продуктивністю підшипників розуміють їх здатність ефективно витримувати навантаження, забезпечувати точність і стабільність обертання, працювати на високих швидкостях без перегрівання, мінімізувати втрати енергії через тертя, а також мати високий термін служби та зносостійкість. Крім того, підвищення продуктивності включає зниження рівня шуму і вібрацій, що сприяє надійній та безперебійній роботі підшипників у різних умовах

експлуатації. Основними факторами, що впливають на роботу підшипників ковзання, є температурні коливання, навантаження та швидкість обертання, що впливає на тертя і знос.

Одним із сучасних напрямків досліджень є використання рідин з низькою в'язкістю для змащування і охолодження підшипників ковзання. Це рішення активно вивчається і вже застосовується у високошвидкісних турбомашинах, які використовують підшипники ковзання [3]. У той же час, конструкційні рішення, такі як сегментні підшипники ковзання, дозволяють підвищити стабільність обертання і зменшити втрати на тертя.

Сучасні дослідження також фокусуються на впровадженні полімерних матеріалів з високими трибологічними властивостями, таких як РЕЕК (поліетіленфторкетон) з графітовими або карбоновими добавками, які використовуються для створення підшипникових елементів. Ці матеріали характеризуються підвищеною стійкістю до тертя, а також забезпечують кращі робочі показники в умовах роботи в середовищах з низькою в'язкістю [4].

У статті буде розглянуто застосування різних полімерних матеріалів, їхній вплив на робочі характеристики підшипників, а також проаналізовані конструкційні рішення, такі як сегментні підшипники ковзання.

Для дослідження підшипників ковзання були використані різні методи, що базуються на теоретичних, числових та експериментальних підходах. Основним завданням досліджень було встановлення впливу матеріалів та змащувальних рідин на продуктивність підшипників ковзання. Використані методи включали числове моделювання (CFD), лабораторні тести з вимірюванням тертя і зносу, а також аналіз поведінки змащувальної рідини.

Одним із основних методів було числове моделювання, зокрема CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки, що використовується для моделювання поведінки змащувальних рідин під час роботи підшипників. У роботах, таких як [1], моделювання дозволяє враховувати термодинамічні ефекти та взаємодію рідини з поверхнею підшипника. Зокрема, важливим фактором у таких дослідженнях є моделювання різних умов змащування, що дозволяє забезпечити точну оцінку роботи підшипника.

Експериментальні дослідження є важливим компонентом аналізу. Лабораторні установки використовуються для імітації реальних умов експлуатації підшипників ковзання. Наприклад, у дослідженнях [4] експериментально досліджувалися підшипники ковзання, спроектовані для роботи на високих швидкостях, де використовувалася полімерна поверхня підшипника та рідини з низькою в'язкістю для змащення та охолодження. Такі дослідження дозволяють оцінити, як саме змащувальна рідина впливає на експлуатаційні характеристики підшипника, такі як тертя, знос, а також температурні режими.

На рис. 1 показано температурні коливання, виміряні в підшипниках під час поступового збільшення швидкості обертання спочатку до 9277 об/хв, а потім до 12700 об/хв. Чорною лінією (Rotation speed) показано зміну швидкості обертання. Червоною лінією показано температуру в передньому радіальному підшипнику (Front_B-temp), яка досягає максимуму 47°C наприкінці тесту при максимальній швидкості. Рожевою лінією відображено температуру на лівій стороні переднього підшипника (A_B_front/left-temp), де вона також збільшується зі швидкістю, але трохи нижча, ніж загальна температура переднього підшипника. Зеленою лінією показано температуру у задньому радіальному підшипнику (Rear_B-temp), де вона залишається дещо нижчою, досягаючи приблизно 45°C. Жовтою лінією показано температуру на правій стороні переднього підшипника (A_B_front/right-temp), яка також зростає до приблизно 43-45°C. Синьою лінією відображено температуру в нижній частині переднього підшипника (A_B_front/bottom-temp), яка досягає максимуму близько 58°C. Коричневою лінією показано температуру в нижній частині заднього підшипника (A_B_rear/bottom-temp), де вона зростає до 45°C. Блакитною лінією показано температуру у верхній частині переднього підшипника (A_B_front/top-temp), яка піднімається до 50°C. Помаранчевою лінією показано температуру у верхній частині заднього підшипника (A_B_rear/top-temp), де температура залишалася на рівні близько 45°C [4]. Загалом, температурні коливання в передньому підшипнику вищі, ніж у задньому, а максимальні температури спостерігаються в нижніх частинах обох підшипників.

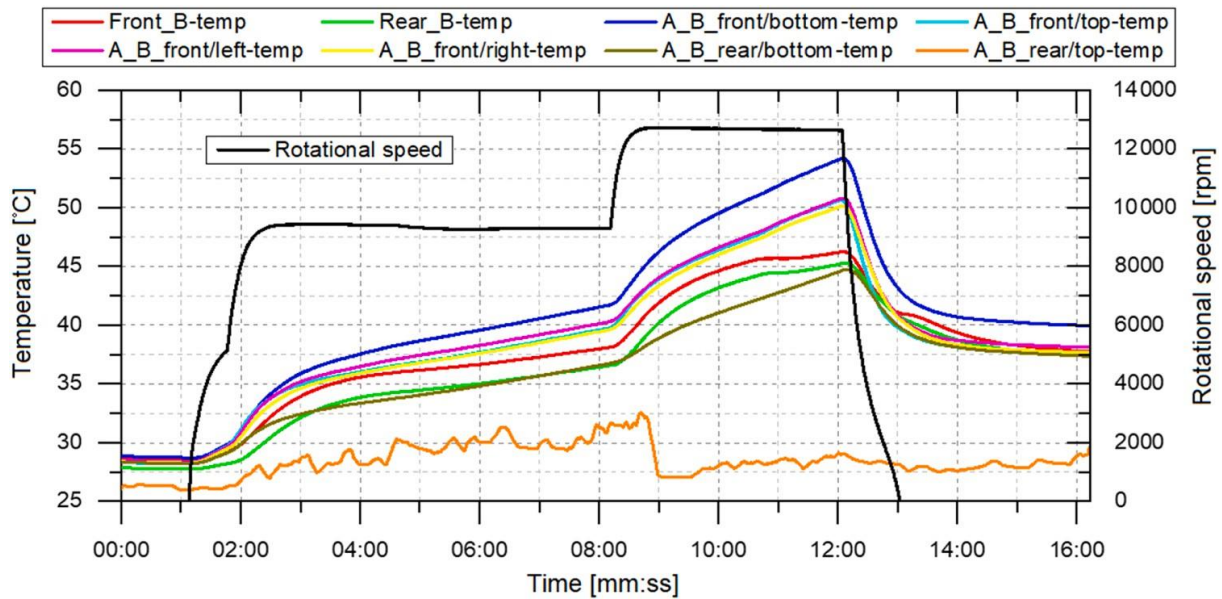


Рис. 1 – Температурний розподіл у підшипнику під час експерименту [4]

Важливим аспектом експериментальних тестів є також оцінка стабільності роботи ротора, що обертається на таких підшипниках.

В представленій на рис. 2 установці застосовуються такий набір датчиків, який дозволяє вимірювати всі найважливіші параметри, на підставі яких можна оцінити справність як підшипників, так і самої експериментальної установки.

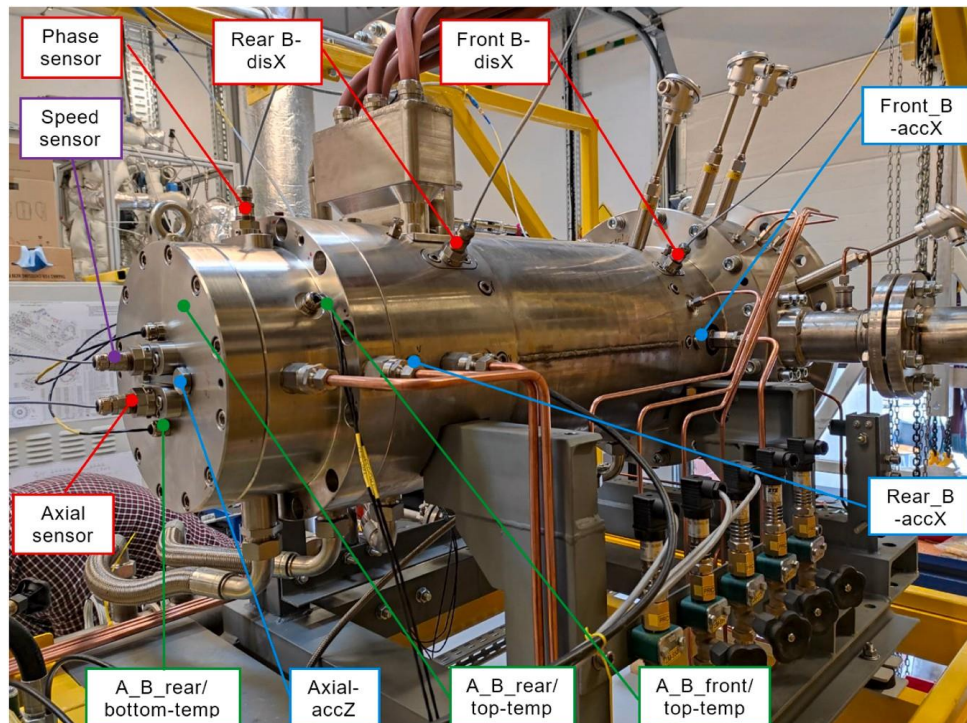


Рис. 2 – Фото експериментальної установки, на якій проводились дослідження [4]

Для розробки нових конструкцій підшипників використовувався також метод скінчених елементів, що дозволяє аналізувати деформацію підшипників під впливом зовнішніх навантажень і змін температур. Це особливо важливо для підшипників, що використовуються в умовах

високих швидкостей і навантажень, де точність розрахунків є критично важливою для забезпечення надійності системи.

Крім того, важливою частиною методів дослідження є аналіз змащувальних рідин. У статті [5] було проведено дослідження використання води як основного змащувального середовища, а також використання невеликої кількості допоміжних змащувальних рідин для покращення характеристик підшипників. Такий підхід дозволяє зменшити тертя та підвищити надійність підшипників в умовах нестабільного змащення.

Експериментальні тести підшипників ковзання були проведені на спеціальних стендах (рис. 3 та рис. 4), де можна імітувати різні режими роботи підшипників, включаючи високі навантаження та оберти. В дослідженні [6] розглядався процес розподілу навантаження в підшипнику під час його роботи в різних режимах. Особлива увага приділялася питанням стабільності роботи системи при використанні води як змащувальної рідини.

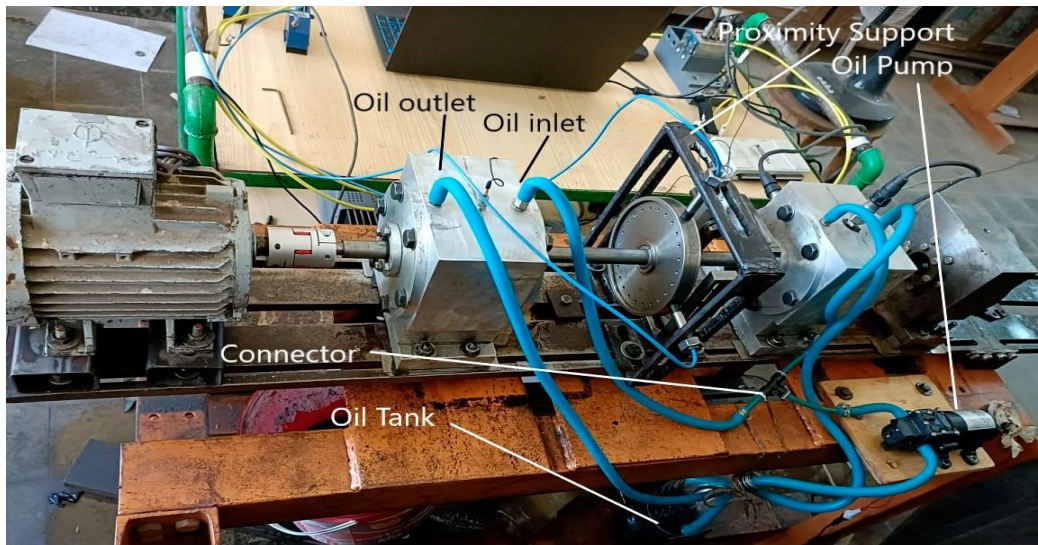


Рис. 3 – Фотографія випробувального стенду [6]

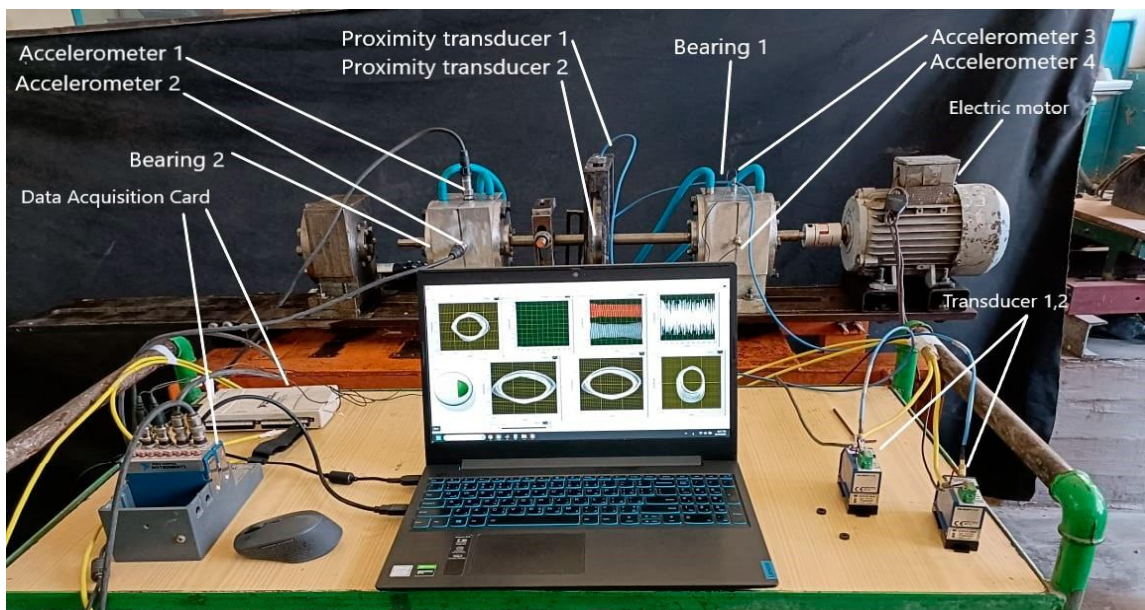


Рис. 4 – Фотографія ключових елементів експериментального стенду [6]

Інший важливий аспект експериментальних тестів включає моніторинг температури в підшипнику, оскільки саме перегрів може стати критичним чинником для відмови підшипника. У дослідженні [7] розглядали, як полімерні поверхні підшипника взаємодіють із рідиною під час тертя і які температурні режими виникають у результаті цього процесу.

Детальні експериментальні дослідження включали також моніторинг динаміки роботи ротора. Це дозволило визначити, як саме впливає навантаження на роботу підшипників ковзання та їхню стабільність під час різних швидкостей роботи.

Числове моделювання є важливою частиною дослідження підшипників ковзання, що допомагає зрозуміти поведінку системи без необхідності проведення багатократних експериментальних досліджень. Моделювання підшипників ковзання, зокрема з використанням гідродинамічних моделей, дозволяє прогнозувати робочі параметри таких систем у широкому діапазоні умов. У статті [8] детально розглядається числове моделювання змащувального шару в підшипниках. Використання таких моделей дозволяє точно оцінювати товщину змащувального шару та його динаміку в різних режимах роботи.

Також слід відзначити, що моделювання змащувальних рідин дозволяє дослідити питання кавітації. У статті [9] було проведено числовий аналіз кавітації у вузьких каналах змащувальної рідини (рис. 5 та рис. 6), що дозволяє передбачити виникнення бульбашок та їхній вплив на роботу підшипника.

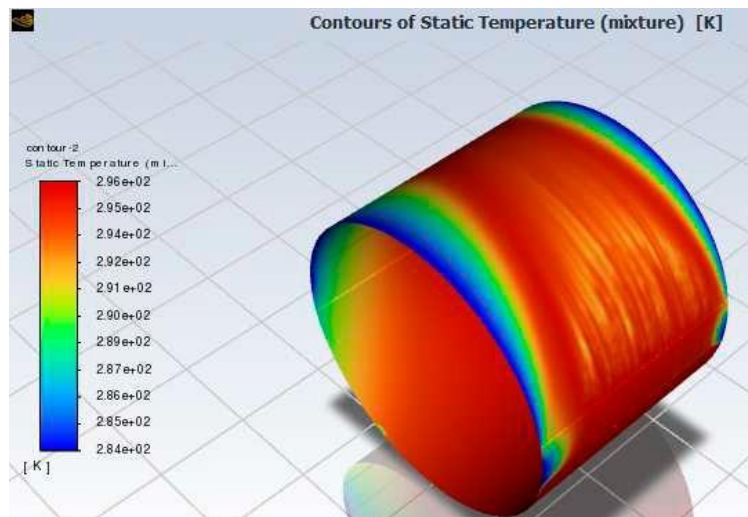


Рис. 5 – Розподіл температури підшипника ковзання з водяним змащенням в аналізі FSI [9]

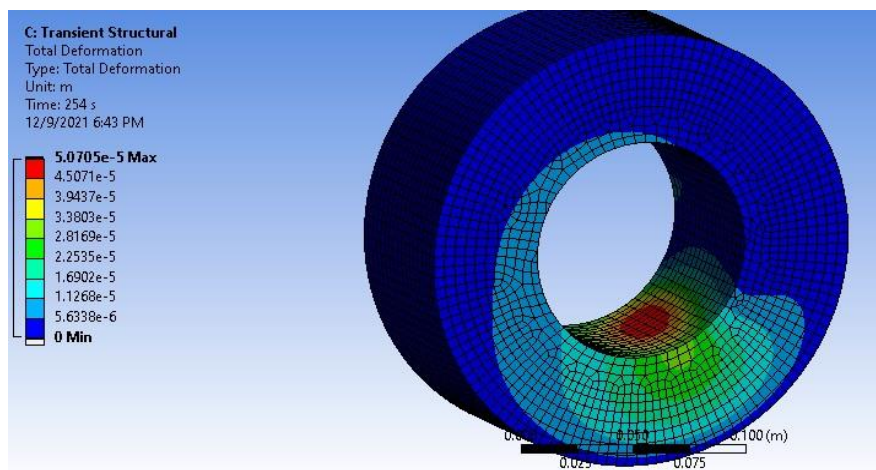


Рис. 6 – Розподіл деформації у втулці, змащеній водою, в аналізі FSI [9]

Це є важливим аспектом, оскільки кавітація може суттєво погіршити роботу підшипника і навіть призвести до його руйнування.

Моделювання підшипників ковзання з працюючих в середовищі низькою в'язкістю має важливе значення для визначення їхніх характеристик у реальних умовах експлуатації. Наприклад, у роботах [2] аналізуються гідродинамічні властивості води як змащувальної рідини, що дає змогу зробити висновки щодо її ефективності за різних умов. Результати таких досліджень, що відображені на рис. 7, рис. 8 та рис. 9, є корисними для визначення оптимальних параметрів підшипників ковзання, що працюють у системах з водним охолодженням.

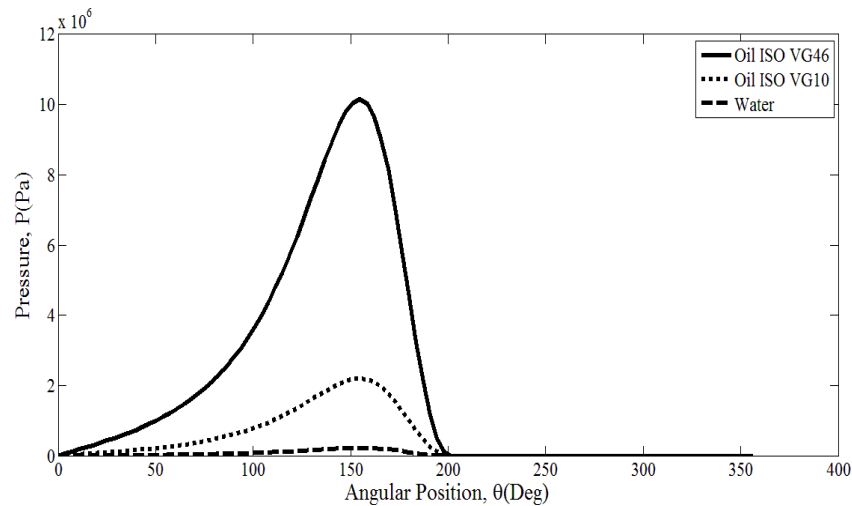


Рис. 7 – Розподіл тиску оливи та води ($\epsilon=0,7$) [2]

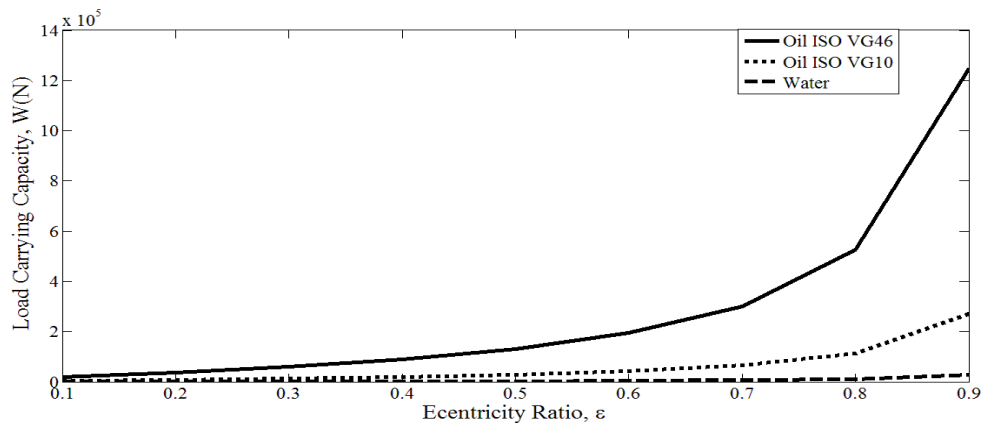


Рис. 8 – Оливо та водо вантажопідйомність [2]

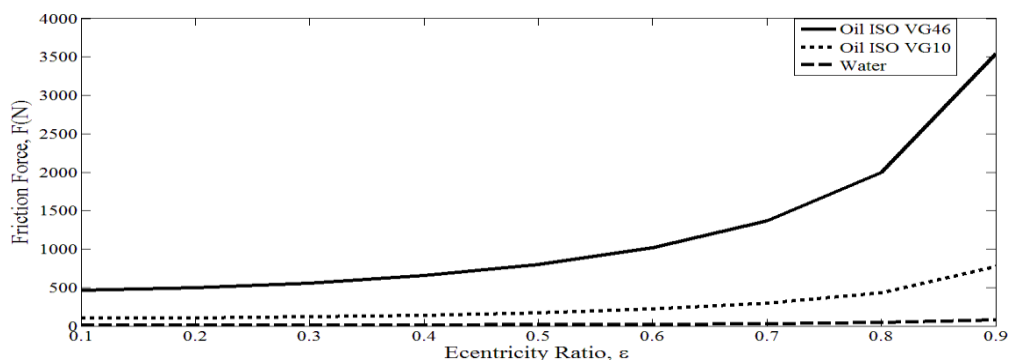


Рис. 9 – Сила тертя в оливі та в воді [2]

Матеріали, що використовуються для підшипників ковзання, відіграють вирішальну роль у забезпеченні їх довговічності та надійності. Останнім часом особливу увагу привертають полімерні матеріали, які відрізняються високими антифрикційними властивостями та стійкістю до зносу. Проводяться експериментальні дослідження композиційних антифрикційних полімерів. Важливим питанням є огляд сучасних антифрикційних полімерних композиційних матеріалів, які використовуються для виготовлення та ремонту пар тертя ковзання. В одному з таких досліджень автори описують розробку лабораторного трибометра, призначеного для перевірки триботехнічних властивостей цих матеріалів. Основною метою дослідження є визначення коефіцієнта тертя та зношувальних властивостей різних композиційних матеріалів [10]. Полімерні матеріали, такі як РЕЕК (поліетіленфторкетон), демонструють високу стійкість до високих температур і тертя, що робить їх придатними для використання у високошвидкісних турбомашинах. У роботі [4] використання полімерних матеріалів було досліджено в умовах високих навантажень, де було продемонстровано, що вони ефективно знижують тертя та забезпечують надійне змащення (рис. 10).

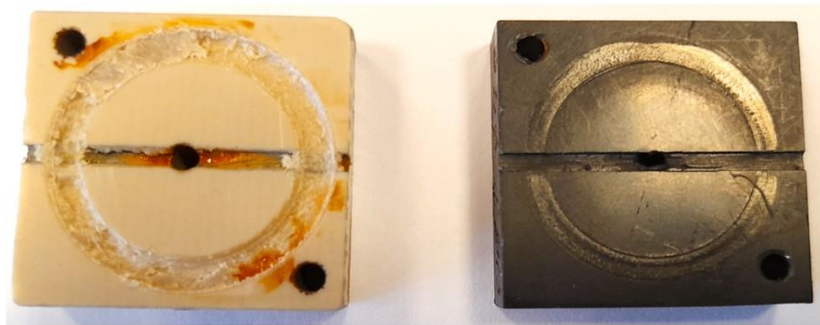


Рис. 10 – Зовнішній вигляд зразків після випробувань – РЕЕК без добавок (бежевий) та РЕЕК CF30 з добавками (чорний) після аналогічних випробувань трибометром [4]

Використанню полімерних матеріалів у підшипниках ковзання присвячено багато досліджень, аналізуються різні типи полімерів та їхні властивості, зокрема здатність зменшувати тертя і підвищувати стійкість до зносу. Було проведено дослідження, які доводять переваг полімерних підшипників у порівнянні з традиційними металевими, а також доведена їх ефективність в умовах різних навантажень та температур [11].

Значна увага приділяється розробці нових антифрикційних та зносостійких покриттів, як приклад, на рис. 11 зображено прототип підшипника з таким покриттям. Такі покриття можуть витримувати високі навантаження та екстремальні температури, що робить їх ідеальними для застосування в ракетобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловостях.



Рис. 11 – Прототип підшипника ковзання з поверхнями ковзання з полімерного матеріалу (ліворуч – повний підшипник, праворуч – сегмент з полімерним матеріалом) [4]

У статті [12] розглядається порівняльний аналіз таких матеріалів, де зазначено, що додавання функціональних наповнювачів може подолати обмеження однополімерного покриття та подовжити термін служби покриття завдяки низькому тертю, високій зносостійкості, високій навантажувальній здатності, стійкості до високих температур і високій адгезії, як показано на рис. 12 [13, 14].

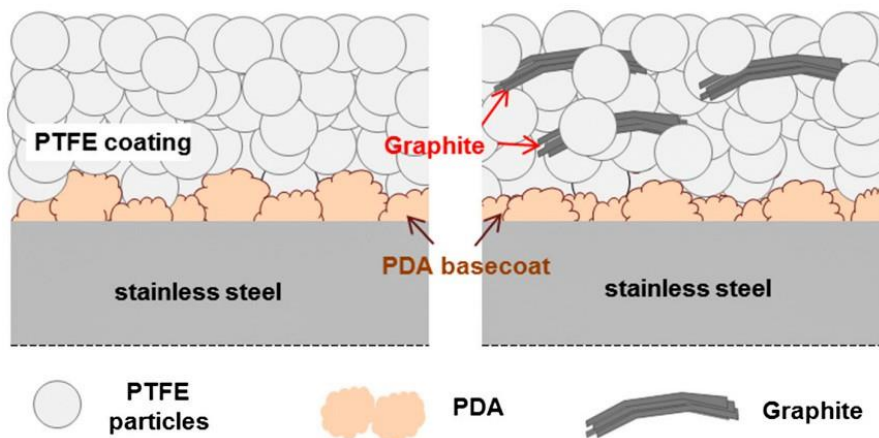


Рис. 12 – Схема PDA/PTFE та PDA/PTFE + графіт [13]

Тефлон (PTFE) є одним із найбільш поширених матеріалів, який демонструє надзвичайно низький коефіцієнт тертя. У статті [15] було проаналізовано ефективність використання підшипників із тефлоновим покриттям у складних умовах експлуатації. Результати досліджень показали, що такі підшипники мають значно нижчий рівень зносу та стабільніше працюють при високих швидкостях.

Інший підхід до зниження тертя — це застосування графітових покриттів, які використовуються для підшипників, що працюють у важких умовах. У роботі [16] досліджувалися графітові підшипники, імпрегновані полімером, що забезпечують високу стійкість до вібрацій і тертя при підвищених температурах (рис. 13). Це важливо для застосувань, де підшипники піддаються постійному навантаженню та впливу високих температур, наприклад, у двигунах внутрішнього згорання.

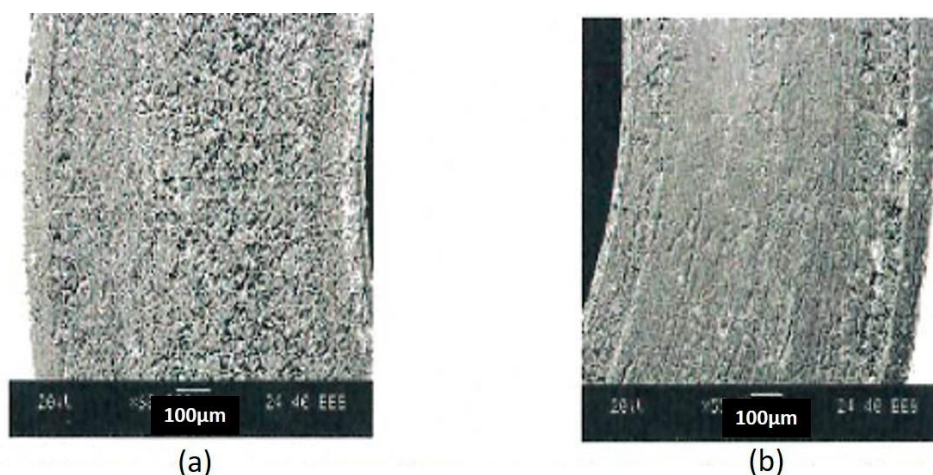


Рис. 13 – Поверхні зносу: (а) зображення зношеної чистої графітової поверхні, (б) РЕМ-зображення зношеної упорної поверхні з імпрегнованого графіту [16]

Змащування є ключовим фактором у забезпеченні надійної роботи підшипників ковзання. Вибір змащувальної рідини впливає на тертя, знос та ефективність роботи всієї системи. У роботі

[6] порівнюються дві основні групи змащувальних рідин: вода та олива. Вода має перевагу у вигляді екологічності та нижчих витрат на обслуговування, тоді як олива забезпечує кращу стабільність роботи при високих швидкостях.

Досліджувались особливості тертя в підшипниках ковзання, що використовуються в металургійному обладнанні. Розглядалася ситуація, коли підшипники працюють у режимі сухого тертя через відсутність змащування. Основна увага приділяється застосуванню самозмащувальних наповнювачів, які виділяють мастильний матеріал під час роботи, знижуючи коефіцієнт тертя і запобігаючи зношуванню. Також у роботі [17] пропонуються математичні моделі для визначення коефіцієнта тертя залежно від геометричних параметрів вставок самозмащувального матеріалу.

Окрім традиційних змащувальних рідин, останнім часом досліджуються також нові складі рідин з низькою в'язкістю, що забезпечують стабільність роботи підшипників у складних умовах. Наприклад, у роботі [5] було показано, що введення додаткової змащувальної рідини дозволяє підвищити надійність підшипників які працюють на воді та зменшити їхнє зношування.

Ще одним важливим аспектом досліджень є вибір і вдосконалення змащувальних рідин. Залежно від умов експлуатації, підшипники можуть використовувати різні типи рідин. Традиційно олива використовувалася через свої високі змащувальні властивості, однак в деяких агрегатах (наприклад, в турбонасосах рідинних ракетних двигунів) використання компонентів з низькою в'язкістю обумовлено технологічними вимогами. Якщо підшипники не адаптовані до таких умов, це може не тільки знизити загальну ефективність обладнання через підвищення тертя та механічні втрати, а й призвести до руйнування всього агрегату. Дослідження дозволяють розробляти підшипники, які зберігають низький коефіцієнт тертя та стабільність навіть при роботі в середовищах з низькою в'язкістю. Як зазначено в роботі [7], рідини з низькою в'язкістю можуть забезпечувати адекватне змащування.

Одним із важливих напрямів розвитку підшипників ковзання є вдосконалення їхніх конструкцій. Традиційні підшипники мають обмеження щодо навантажувальної здатності та ефективності при високих швидкостях. Однак, конструкції, такі як сегментні підшипники ковзання, зображені на рис. 14, можуть суттєво покращити робочі характеристики. Ці конструкції забезпечують кращу підтримку ротора і дозволяють зменшити вібрації навіть при високих обертах. У дослідженні [18] розглянуто особливості таких підшипників, де показано, що вони забезпечують стабільну роботу при високих навантаженнях і мінімальний рівень вібрацій.

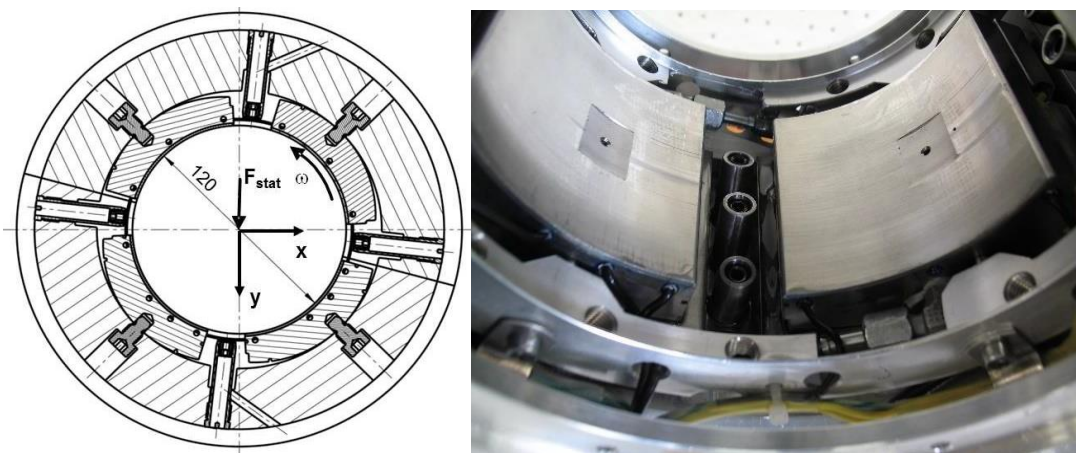


Рис. 14 – Конструкція підшипника ковзання з поворотними сегментами [18]

Дослідження також показують, що підшипники ковзання доводять свою ефективність при різних умовах експлуатації. В статті [19] проводиться детальний аналіз поведінки ротора та підшипника, зображеного на рис. 15, з використанням CFD-моделювання. Це дослідження демонструє порівняння експериментального методу дослідження підшипників ковзання та методу дослідження за допомогою моделювання.



Рис. 15 – Досліджуваний підшипник ковзання [19]

Таблиця 1

Параметри досліджуваного підшипника [19]

Внутрішній діаметр D, мм	Ширина підшипника L, мм	Зазор e, мкм	Швидкість, рад/с
4	13	10	328-3000
Густина мастила (15 °С), кг/м ³	В'язкість мастила (40°С), м ² /с		В'язкість мастила (100°С), м ² /с
1060	220·10 ⁻⁶		40·10 ⁻⁶

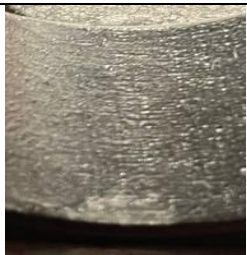
Іншим важливим аспектом є те, що нові конструкції підшипників, наприклад, з використанням додаткових систем для змащування (наприклад, системи подачі олії під високим тиском), суттєво покращують робочі характеристики. Як описано в статті [2], такі системи знижують ризик зносу підшипників, що є особливо важливим для агрегатів, які працюють на високих швидкостях.

Проаналізувавши інформацію з наявних джерел, було вирішено провести власний експеримент по випробуванню показників зношування підшипників ковзання. Було виготовлено зразки зі сталі 12X18H10 та додатково покриті тефлоном, випробування проводилися згідно з ГОСТ 11012-74, на випробувальній установці (рис. 16). Зразки пройшли кондиціонування і потім випробовувалися при стандартній атмосфері, визначеної за ГОСТ 12423-66.

Як контртіло для випробувань застосовувалася втулка діаметром Ø27,6×30 мм із сталі 45 (понад тонке шліфування наждачним папером P1500, твердість – 40HRC). Кількість обертів контртіла – 3550 об/хв. Нормальне навантаження на зразок – 4,5 кг. Час випробування одного зразка – 30-240 с. Випробування для кожного зразків матеріалу проводилося по одному сліду.

Деякі результати випробувань представлені у вигляді фотографій поверхонь зносу в таблиці 2. Стан поверхні досліджувався за допомогою мікроскопа (рис. 17).

Таблиця 2

№		Результати випробувань				
		Час випробування				
	Ra	30 с	60 с	90 с	120 с	240 с
1.	1.6					
2.	1.6					
3.*	0.8					
4.*	0.8					

* випробування зразків з подачею води в зону тертя.



Рис. 16 – Дослідний зразок закріплений в установці для випробувань



Рис. 17 – Дослідження стану поверхні після випробувань

Висновки

Літературний огляд показав, що підшипники ковзання залишаються важливим елементом багатьох промислових систем, зокрема в металургії, турбомашинах та авіаційній промисловості. Використання інноваційних матеріалів, таких як тефлонові покриття, дозволяє значно підвищити ефективність та надійність цих систем, знижуючи знос і покращуючи експлуатаційні характеристики. Сучасні дослідження у сфері підшипників ковзання демонструють суттєвий прогрес у розробці нових матеріалів та конструкцій, що дозволяють підвищити їхню ефективність та надійність. Полімерні матеріали виявляються надзвичайно ефективними у підшипниках, які працюють у важких умовах експлуатації, забезпечуючи зниження тертя та високі антифрикційні властивості, їх високу стійкість до зношування та можливість працювати при високих навантаженнях.

Дослідження, які проводились авторами, підтверджують ефективність використання полімерних матеріалів в конструкції підшипників ковзання. На деяких зразках присутні напливи тефлонового покриття в районі входу/виходу і пляма зношення починалась саме на них. Площа плями зношування збільшується із збільшенням часу проведення випробування для всіх зразків. Площа плями зношування залежить від наявності мікронерівностей на поверхні тертя, за наявності мікро виступів на поверхні, зношування йде по їх вершинах (площа зношування знижується). Подача води до зони тертя суттєво зменшує знос. Товщина тефлонового покриття – 30-40 мкм.

Окрім матеріалів, важливим є розвиток нових конструкцій підшипників ковзання, таких як сегментні підшипники ковзання, які забезпечують кращу стабільність роботи ротора. Такі конструкції значно покращують характеристики підшипників і дозволяють знизити вібрації та зношування, що робить їх перспективними для використання в високошвидкісних турбомашинах та інших галузях.

Змащувальні рідини також залишаються важливим аспектом розвитку технологій підшипників ковзання.

Загалом, можна зробити висновок, що подальші дослідження в області матеріалів та конструкцій підшипників ковзання відкривають нові можливості для підвищення їх ефективності та надійності. У майбутньому можна очікувати подальший розвиток цієї галузі, зокрема за рахунок вдосконалення методів моделювання та нових матеріалів, що дасть змогу використовувати підшипники ковзання в ще складніших і вимогливіших умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел:

1. An Advanced Microturbine System with Water-Lubricated Bearings / Nakano S., Kishibe T., Inoue T., Shiraiwa H. *International Journal of Rotating Machinery*. 2009. Vol. 2009. № 1. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2009/718107>.
2. Elsayed E. K., Alaa M. A. El-Buchth. A study on hydrodynamic water lubricated journal bearing. *Engineering Research Journal*. 2017. Vol. 153. Pp. M1-M15.
3. Comparison of the lubrication performances of water-lubricated and oil-lubricated plain journal bearings / Zhang X. L., Yin Zh. W., Jiang D., Gao G. Yu. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 711. Pp. 27-30. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.711.27>.
4. Theoretical analysis and experimental tests of tilting pad journal bearings with shoes made of polymer material and low-boiling liquid lubrication / G. Żywica et al. *Tribology International*. 2023. Vol. 189. Pp. 108991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108991>.
5. Analysis of Water-Lubricated Journal Bearings Assisted by a Small Quantity of Secondary Lubricating Medium with Navier-Stokes Equation and VOF Model / X. Zhang et al. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 1. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12010016>.
6. Ahmed O., El-Sayed T. A., Sayed H. A Comparative Study of Theoretical and Experimental Analysis on Balanced and Unbalanced Rotors Supported by Oil-and Water-Lubricated Journal Bearings. *Machines*. 2024. Vol. 12. № 10. Pp. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12100675>.
7. Static load characteristics of hydrostatic journal bearings: Measurements and predictions / Yi H., Jung H., Kim K., Ryu K. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 19. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197466>.
8. Gu C., Cui Y., Zhang D. Research on the Optimal Design Approach of the Surface Texture for Journal Bearings. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 4. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12040111>.
9. Charamis D., Nikolakopoulos P. G. Investigation of Cavitated Flow in Water-Lubricated Bearings Considering Surface Roughness, Thermal, and Elastic Effects. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 4. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12040107>.
10. Экспериментальные исследования композитных антифрикционных полимеров / Ищенко А. А., Радионенко А. В., Киндрачук М. В., Тисов О. В. *Problems of Friction and Wear*. 2019. № 4(85). С. 37-43. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(85\).13870](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(85).13870).
11. Применение полимерных материалов в подшипниках скольжения / А. А. Ищенко, А. В. Радионенко, А. В. Антоненко, А. А. Родак. *Металлургические процессы и оборудование*. 2008. № 4. С. 22-25.
12. Overview of friction and wear performance of sliding bearings / F. Du et al. *Coatings*. 2022. Vol. 12. № 9. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12091303>.
13. The effects of graphite filler on the tribological properties of polydopamine/PTFE coatings / Beckford S., Cai J., Fleming R. A., Zou M. *Tribology Letters*. 2016. Vol. 64. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0777-5>.
14. The role of surface topography in the evolving microstructure and functionality of tribofilms of an epoxy-based nanocomposite / G. Zhang et al. *Wear*. 2016. Vol. 364. Pp. 48-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.012>.
15. Experimental and numerical analysis on the seizure of a carbon-filled PTFE central groove journal bearing during start-up period / B. Pap et al. *Lubricants*. 2018. Vol. 6. № 1. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants6010014>.
16. Friction Evolution of Graphite Bearing Impregnated with Polymer Subjected to Vibration Fretting at High Temperature / H. Zaïdi et al. *Coatings*. 2024. Vol. 14. № 2. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14020207>.
17. Ищенко А. А., Радионенко А. В., Антоненко А. В. Особенности процесса трения в подшипниках скольжения с самосмазывающим наполнителем. *Металлургические процессы и оборудование*. 2011. № 3. С. 24-28.
18. Hagemann T., Pfeiffer P., Schwarze H. Measured and predicted operating characteristics of a tilting-pad journal bearing with jacking-oil device at hydrostatic, hybrid, and hydrodynamic operation. *Lubricants*. 2018. Vol. 6. № 3. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants6030081>.

19. Concli F. Journal bearing: An integrated CFD-analytical approach for the estimation of the trajectory and equilibrium position. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 23. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10238573>.

References:

1. S. Nakano, T. Kishibe, T. Inoue, and H. Shiraiwa, «An Advanced Microturbine System with Water-Lubricated Bearings», *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2009, № 1, pp. 1-12, 2009. doi: 10.1155/2009/718107.
2. E.K. Elsayed, and M.A. El-Buch Alaa, «A study on hydrodynamic water lubricated journal bearing», *Engineering Research Journal*, vol. 153, pp. M1-M15, 2017.
3. X.L. Zhang, Zh.W. Yin, D. Jiang, and G.Yu Gao, «Comparison of the lubrication performances of water-lubricated and oil-lubricated plain journal bearings», *Applied Mechanics and Materials*, vol. 711, pp. 27-30, 2015. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.711.27.
4. G. Żywica, A. Olszewski, P. Bagiński, A. Andrearczyk, T. Żochowski, and P. Klonowicz, «Theoretical analysis and experimental tests of tilting pad journal bearings with shoes made of polymer material and low-boiling liquid lubrication», *Tribology International*, vol. 189, pp. 108991, 2023. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108991.
5. X. Zhang et al., «Analysis of Water-Lubricated Journal Bearings Assisted by a Small Quantity of Secondary Lubricating Medium with Navier–Stokes Equation and VOF Model», *Lubricants*, vol. 12, № 1, pp. 1-21, 2024. doi: 10.3390/lubricants12010016.
6. O. Ahmed, T.A. El-Sayed, and H. Sayed, «A Comparative Study of Theoretical and Experimental Analysis on Balanced and Unbalanced Rotors Supported by Oil-and Water-Lubricated Journal Bearings», *Machines*, vol. 12, № 10, pp. 1-27, 2024. doi: 10.3390/machines12100675.
7. H. Yi, H. Jung, K. Kim, and K. Ryu, «Static load characteristics of hydrostatic journal bearings: Measurements and predictions», *Sensors*, vol. 22, № 19, pp. 1-20, 2022. doi: 10.3390/s22197466.
8. C. Gu, Y. Cui, and D. Zhang, «Research on the Optimal Design Approach of the Surface Texture for Journal Bearings», *Lubricants*, vol. 12, № 4, pp. 1-20, 2024. doi: 10.3390/lubricants12040111.
9. D. Charamis, and P.G. Nikolakopoulos, «Investigation of Cavitated Flow in Water-Lubricated Bearings Considering Surface Roughness, Thermal, and Elastic Effects», *Lubricants*, vol. 12, № 4, pp. 1-18, 2024. doi: 10.3390/lubricants12040107.
10. A.A. Ishchenko, A.V. Radionenko, M.V. Kindrachuk, and O.V. Tisov, «Eksperymentalnie yssledovanyia kompozytnykh antyfraktsionnykh polymerov» [«Experimental studies of composite antifric-tion polymers»], *Problems of Friction and Wear*, № 4(85), pp. 37-43, 2019. doi: 10.18372/0370-2197.4(85).13870. (Rus.)
11. A.A. Ishchenko, A.V. Radionenko, A.V. Antonenko, and A.A. Rodak, «Prymenenye polymernykh materialov v podshypanykh skolzheniya» [«Application of polymeric materials in plain bear-ings»], *Metallurgicheskiye protsessy i oborudovaniye – Metallurgical processes and equipment*, № 4, pp. 22-25, 2008. (Rus.)
12. F. Du et al., «Overview of friction and wear performance of sliding bearings», *Coatings*, vol. 12, № 9, pp. 1-15, 2022. doi: 10.3390/coatings12091303.
13. S. Beckford, J. Cai, R.A. Fleming, and M. Zou, «The effects of graphite filler on the tribological properties of polydopamine/PTFE coatings», *Tribology Letters*, vol. 64, pp. 1-10, 2016. doi: 10.1007/s11249-016-0777-5.
14. G. Zhang, W. Österle, B. Jim, I. Häusler, R. Hesse, and B. Wetzel, «The role of surface topography in the evolving microstructure and functionality of tribofilms of an epoxy-based nanocomposite», *Wear*, vol. 364, pp. 48-56, 2016. doi: 10.1016/j.wear.2016.06.012.
15. B. Pap et al., «Experimental and numerical analysis on the seizure of a carbon-filled PTFE central groove journal bearing during start-up period», *Lubricants*, vol. 6, № 1, pp. 1-24, 2018. doi: 10.3390/lubricants6010014.
16. H. Zaïdi, S. Tournis, L. Deville, C. Richard, M. Aissa, and K. Bouguerra, «Friction Evolution of Graphite Bearing Impregnated with Polymer Subjected to Vibration Fretting at High Temperature», *Coatings*, vol. 14, № 2, pp. 1-15, 2024. doi: 10.3390/coatings14020207.
17. A.A. Ishchenko, A.V. Radionenko, and A.V. Antonenko, «Osobennosti protsessa treniya v podshypanykh skolzheniya s samosmazivaiushchym napolnytelem» [«Features of the friction process

- in plain bearings with self-lubricating filler»], *Metallurhicheskiye protsessi y oborudovanye – Metallurgical processes and equipment*, № 3, pp. 24-28, 2011. (Rus.)
18. T. Hagemann, P. Pfeiffer, and H. Schwarze, «Measured and predicted operating characteristics of a tilting-pad journal bearing with jacking-oil device at hydrostatic, hybrid, and hydrodynamic operation», *Lubricants*, vol. 6, № 3, pp. 1-15, 2018. doi: **10.3390/lubricants6030081**.
19. F. Concli, «Journal bearing: An integrated CFD-analytical approach for the estimation of the trajectory and equilibrium position», *Applied Sciences*, vol. 10, № 23, pp. 1-15, 2020. doi: **10.3390/app10238573**.

Стаття надійшла 07.11.2024

Стаття прийнята 02.12.2024

УДК 621.7-4

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321231

© Іщенко А.О.¹, Рассохін Д.О.², Носовська О.В.³,
Кравченко В.М.⁴, Бем Р.⁵

ВИВЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕМОНТІВ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

У статті розглядається вплив зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами. У сучасній важкій промисловості та машинобудуванні застосування композитів набуває дедалі більшої популярності завдяки їхнім численним перевагам, таким як швидке відновлення працездатності обладнання та можливість проведення ремонтних робіт безпосередньо на місці експлуатації. Проте виконання ремонтів у складних умовах, наприклад, при низьких температурах і високій вологості, ставить перед інженерами нові виклики. У статті аналізуються останні дослідження, які показують, що для забезпечення надійності металополімерного з'єднання необхідно дотримуватися певних умов відносної вологості та температури. Встановлено, що найкращі результати адгезійної міцності досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом та знежирення поверхні спеціальними очисниками. Дослідження проводилися на зразках композитного матеріалу «мультиметал-сталь 1018», виготовленого фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany). Випробування виконувалися на розривній машині PM20 в лабораторії кафедри МОЗЧМ ДВНЗ «ПДТУ». Основні результати показали, що довговічність обладнання, відремонтованого за допомогою композитів, значною мірою залежить від умов нанесення матеріалу на металеву поверхню. При високій вологості та низькій температурі на поверхневих шарах металу конденсується волога, що призводить до корозійних процесів і зниження адгезійної міцності з'єднання «метал-композит». Для підвищення адгезійної міцності рекомендується використовувати рідкотекучий мультиметал як перший адгезійний шар або підігрівати

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6189-7830, ischenko50@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: 0000-0002-3479-9485, dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1313-4767, nosovska_o_v@pstu.edu

⁴ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-5318-6277, kvm1249@gmail.com

⁵ д-р техн. наук, професор, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: 0000-0001-7768-4592, robert.boehm.1@htwk-leipzig.de

настоподібний мультиметал. Додатково розглянуто можливість знежирення поверхонь ацетоном, що є більш доступним, хоча фірмові очисники демонструють кращі результати в умовах тривалого використання. Висновки статті підтверджують необхідність врахування зовнішніх факторів під час проведення ремонтних робіт з використанням полімерних композитів. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вивчення впливу інших зовнішніх факторів, таких як механічні навантаження та хімічна агресія, на властивості композитних матеріалів.

Ключові слова: полімер, відновлення, композит, адгезія, обладнання, мультиметал.

A.O. Ishchenko, D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska, V.M. Kravchenko, R. Böhm. Studying the complex influence of external factors on the effectiveness of repairs with polymer composite materials. The article discusses the influence of external factors on the effectiveness of repairs with polymer composite materials. In modern heavy industry and mechanical engineering, the use of composites is becoming increasingly popular due to their numerous advantages, such as rapid restoration of equipment performance and the ability to carry out repairs directly at the place of operation. However, performing repairs in difficult conditions, such as low temperatures and high humidity, poses new challenges for engineers. The article analyzes recent studies that show that certain conditions of relative humidity and temperature must be met to ensure the reliability of a metal-polymer joint. It was found that the best adhesion strength results are achieved after processing the samples with a grinding wheel and degreasing the surface with special cleaners. The research was conducted on samples of the composite material «multimetal steel 1018» manufactured by Diamant Metal Plastics GmbH (Germany). The tests were performed on the RM20 tensile machine in the laboratory of the PSTU Department of MMCM. The main results showed that the durability of equipment repaired with composites largely depends on the conditions of material application to the metal surface. At high humidity and low temperature, moisture condenses on the surface layers of the metal, which leads to corrosion processes and a decrease in the adhesive strength of the metal-composite joint. To increase the adhesion strength, it is recommended to use a liquid multimetal as the first adhesive layer or to heat a paste multimetal. Additionally, the possibility of degreasing surfaces with acetone is considered, which is more affordable, although branded cleaners show better results in conditions of long-term use. The conclusions of the article confirm the need to take into account external factors when carrying out repair work using polymer composites. Further research should be aimed at studying the effect of other external factors, such as mechanical stress and chemical aggression, on the properties of composite materials.

Keywords: polymer, restoration, composite, adhesion, equipment, multimetal.

Постановка проблеми. Застосування композитних матеріалів під час відновлення промислового обладнання набуває дедалі більшого поширення у важкій промисловості та машинобудуванні. Відновлення деталей різного устаткування в умовах механічних цехів, коли ремонт виконується в закритих опалювальних приміщеннях, – це оптимальний варіант застосування композитів. Однак у цьому разі не виникає особливих перешкод для використання під час відновлення традиційних методів ремонту – наплавлення, напилення та механічного оброблення. Ефективне ж використання композитів має місце насамперед у тих випадках, коли ремонт виконують в умовах діючого прокатного цеху або взагалі просто неба, без демонтажу деталей і їх відправлення в механічний цех. Ще один фактор, що забезпечує безсумнівну перевагу композитних матеріалів, – це можливість відновлення працездатності машини в найкоротші терміни і на місці експлуатації. Це виявляється можливим шляхом виключення операцій мехобробки завдяки формуванню посадкових та інших поверхонь за допомогою шаблонів і кондукторів. Безумовно, ремонт на місці експлуатації не вичерпує всіх переваг і можливостей ремонту композитами, оскільки трапляються випадки, коли навіть у механічному цеху розібрати конструкцію для встановлення деталі, що відновлюється, на верстат не представляється можливим з тих чи інших причин. А застосування композитів у такому разі дає змогу розв'язати виниклу ремонтну проблему. До таких випадків можна віднести, наприклад, відновлення дзеркала гідроциліндра, коли він вбудований в іншу корпусну деталь, наприклад, у корпус невеликого преса. Слід зазначити,

що композитні матеріали мають безсумнівні переваги, такі як швидке відновлення працездатності машини та можливість ремонту на місці експлуатації без демонтажу деталей. Проте використання композитів у складних умовах (наприклад, при ремонті на відкритому повітрі або в неопалюваних приміщеннях) стикається з багатьма викликами, пов'язаними з впливом зовнішніх факторів на міцність та адгезійну здатність матеріалу. Ця проблема є важливою як з наукової точки зору, оскільки вимагає глибокого розуміння властивостей композитів у реальних умовах, так і з практичної, оскільки її вирішення дозволить значно підвищити ефективність ремонтних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Очікувані властивості композитних матеріалів безпосередньо залежать від призначення та сфери їх застосування, а також від складу і структури компонентів, з яких вони виготовлені [1]. Враховуючи специфічні вимоги до міцності, жорсткості, стійкості до корозії, температурної стабільності, електропровідності або інших властивостей, композитні матеріали можуть бути адаптовані для використання в різних галузях промисловості, таких як авіація, автомобілебудування, будівництво, медична техніка та багато інших. Наприклад, у авіаційній промисловості часто потрібні матеріали з високою міцністю при низькій вазі, тоді як у будівництві важливішими можуть бути довговічність та стійкість до погодних умов. У машинобудуванні, навіть у межах однієї конструкції, можуть використовуватись декілька типів композитів одночасно (рис. 1).

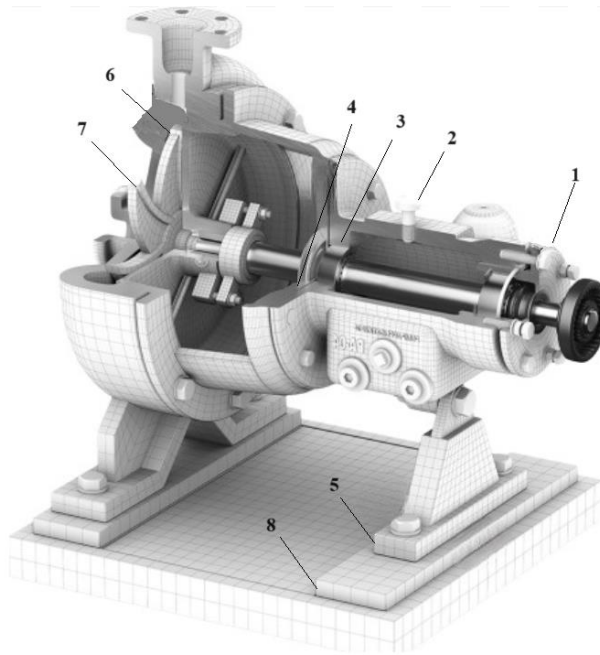


Рис. 1 – Застосування композитних матеріалів: 1. Для відновлення посадкового гнізда підшипника в корпусі; 2. Герметизація масляної пробки; 3. Ущільнення посадкового гнізда підшипника; 4. Герметизація фланців насоса; 5. Відновлення опорних поверхонь корпусу; 6. Захист корпусу насоса від зношення; 7. Захист робочого колеса насоса; 8. Створення захисного шару між опорою корпусу і фундаментом плитою (фото Henkel, Adhesive Technologies, www.henkel.com)

Розглянемо основні сфери застосування композитів, а також вимоги, що висувуються них:

1. При будівництві первинних конструкцій, що дають змогу знизити вагу конструкції та підвищити її втомну стійкість. Необхідна висока динамічна міцність, а також стійкість у робочому діапазоні температур;

2. Збірка вторинних конструкцій, для фіксації частин або компонентів на основній конструкції, а також для підвищення розподілу навантаження. Важливе значення має адгезія. При цьому композити мають бути такими, що легко наносяться і швидко тверднуть;

3. Механічна збірка в межах пари елементів дає змогу запобігти самовідгвинчуванню деталей, а також забезпечує герметизацію. Важливим фактором є витрата композитних матеріалів, що дає змогу виконувати неодноразову заміну компонентів механізму із заміною композиту. Крім того, композит має виконувати функцію ущільнювача, що підвищує міцність з'єднання;

4. Захист поверхонь, що дає змогу створити додатковий шар, який перешкоджає зносу. Пріоритетним є час ремонту з використанням композитних матеріалів.

У поточній статті ми розглянемо тільки варіант застосування композитних матеріалів як шару, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження.

Не менш важливим питанням є і безпека застосування композитів. Зокрема, відомі розробки, спрямовані на унеможливлення викиду розчинників під час футерування обладнання гумоподібним композитом [2].

Не менш важливим є умови нанесення композиту, які можуть впливати на його кінцеві характеристики. Ці умови включають температуру та вологість середовища, методи нанесення (наприклад, ручне накладання шарів, розпилення або використання прес-форм), а також час і технології затвердіння. Важливо також враховувати адгезію між шарами та можливість виникнення дефектів, таких як бульбашки повітря або неоднорідності в структурі матеріалу. Всі ці фактори можуть значно впливати на якість та довговічність готового композитного виробу, тому ретельне планування та контроль процесу нанесення є критичними для досягнення бажаних властивостей матеріалу. Крім того, ремонт на місці експлуатації об'єкта в неопалюваному приміщенні або взагалі просто неба пов'язаний з цілою низкою обмежень як за температурними умовами, так і з інших причин, що впливають і на міцність композиту, і на його адгезійну здатність. Саме з цієї причини видається доцільним провести аналіз виконаних раніше експериментальних досліджень з погляду особливостей властивостей композитів у реальних умовах їх застосування.

До таких умов насамперед слід віднести:

- температурні режими застосування та експлуатації композитів;
- вологість повітря під час виконання робіт;
- якість підготовки поверхні під час нанесення композиту, включно із зачищенням і знежиренням;
- правила нанесення композиту на відновлювану поверхню.

Від цих факторів залежать як міцність композитного матеріалу, так і його адгезійна здатність. Попередні дослідження [3-5] показали, що для забезпечення довговічності і надійності металополімерного з'єднання необхідно дотримуватись певних умов відносної вологості та температури. Дослідження адгезійної міцності показали, що наявність забруднювальних речовин на поверхні металу, метод підготовки поверхні та якість знежирення значно впливають на міцність з'єднання. Попередня обробка поверхні може бути виконана за допомогою хімічних методів, плазмової обробки, лазерної обробки або піскоструминної обробки. При цьому застосування лазера активує поверхню вуглепластиків і негативно впливає на міцність основної поверхні [6]. Необхідність попередньої обробки продиктована не тільки прагненням видалити забруднення, а й необхідністю збільшити полярність поверхні, а також площу контакту на межі полімер-поверхня. Слід зазначити, що піскоструминна обробка є трудомістким процесом і може призвести до пошкодження поверхні. Одним із сучасних методів зачистки поверхні є створення відривного шару [7]. При цьому видалення зношеного шару призводить до утворення нової, незабрудненої поверхні. Однак таку поверхню необхідно активувати, а саму технологію потрібно застосувати під час виготовлення деталі, що робить її використання для наявних механізмів нерентабельним. Застосування вологої хімічної обробки поверхонь дає змогу ефективно підвищити міжфазну адгезію [8]. Однак такий метод не може бути автоматизований. Крім того, під час обробки утворюється велика кількість хімічних відходів, що може завдати істотної шкоди навколишньому середовищу.

Попри значні досягнення у вивченні властивостей композитів, залишаються *невирішеними питання впливу низьких температур і високої вологості на полімеризацію матеріалу, а також оптимізації умов нанесення композитів на різні поверхні*. Необхідно також детальніше вивчити вплив різних методів підготовки поверхні та знежирення на адгезійну міцність з'єднань у реальних умовах експлуатації.

Метою цієї статті є вивчення впливу зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами. Завданнями дослідження є:

1. Визначення оптимальних умов відносної вологості та температури для нанесення композитних матеріалів.

2. Аналіз впливу різних методів підготовки поверхні та знежирення на адгезійну міцність з'єднань.

3. Розробка рекомендацій щодо використання композитних матеріалів у складних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилися на зразках композитного матеріалу «мультиметал-сталь 1018», виготовленого фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany) з такими характеристиками (Таблиця 1).

Таблиця 1

Технічні характеристики матеріалу «мультиметал-сталь 1018»

Межа міцності при стисненні	Н/мм ²	макс.160
Межа міцності при розтягуванні	Н/мм ²	76
Межа міцності під час зсуву	Н/мм ²	89
Межа міцності під час вигину	Н/мм ²	22
Модуль пружності	Н/мм ²	14.000
Коефіцієнт лінійного подовження		$32 \cdot 10^{-6} \text{ K}$
Температурна стійкість - тривала	°C	-40 / + 90°C
Коефіцієнт тертя зчеплення зчеплення		> 0,5
Час обробки при +20°C	хв.	~ 45
Затвердіння при +5°C	год.	~ 72
Затвердіння при +20°C	год.	~ 24
Питома вага	г/см ³	2,4
Зберігання	міс.	12
Розмір упаковки	кг	1,5 + 4,5

Випробування виконували на розривній машині РМ20 в лабораторії кафедри МОЗЧМ ДВНЗ «ПДТУ». Основні результати показали, що довговічність обладнання, відремонтованого за допомогою композитів, залежить від температури та вологості навколишнього середовища. За високої вологості та при цьому недостатньо високої температури на поверхневих шарах металів, з якими контактуватиме композит, конденсується волога, яка згодом може відігравати роль центрів зародження корозійних процесів, що знижують адгезійну міцність з'єднання «метал-композит». Вивчення впливу цих чинників дало змогу рекомендувати таке співвідношення відносної вологості та температури навколишнього середовища, яке визначає значення температури, за якої можна виконати ремонт, забезпечуючи довговічність і надійність утвореного металополімерного з'єднання [3]. Для забезпечення надійності металополімерного з'єднання рекомендується дотримуватись наступних умов:

- Відносна вологість 80% при температурі > 30°C;
- Відносна вологість 70% при температурі > 25°C;
- Відносна вологість 60% при температурі > 18°C.

Температура навколишнього повітря, а отже й температура композиту в момент змішування та полімеризації, визначає багато інших особливостей застосування цих матеріалів, без знання та врахування яких виконання ремонтних робіт не буде успішним та ефективним.

Так, наприклад, температура навколишнього повітря визначає час, відведений для вироблення, тобто час нанесення композиту на металеву поверхню. Експерименти, проведені з «мультиметалом-сталь 1018», дали змогу побудувати графік, наведений на рис. 2. Він у першому наближенні дає змогу оцінити, як впливає підвищення вихідної температури його компонентів на час вироблення і за необхідності виконати коригування технології відповідно до зовнішніх умов проведення ремонтних робіт.

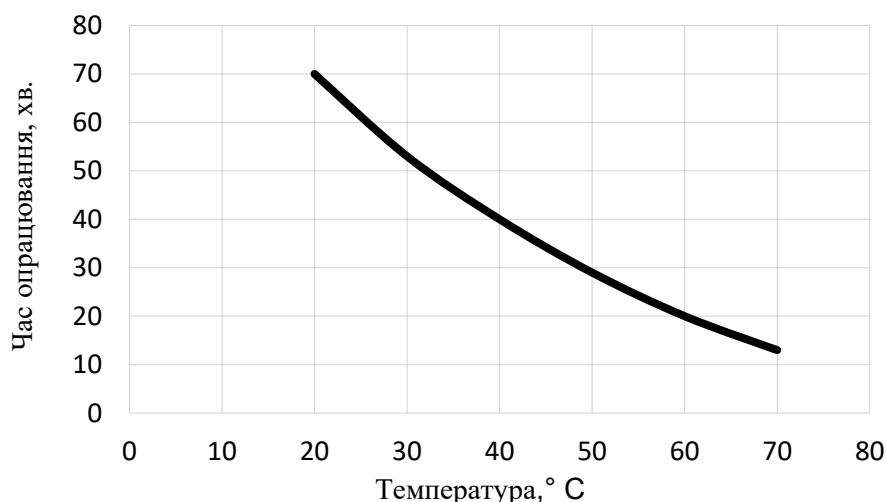


Рис. 2 – Залежність часу вироблення матеріалу «мультиметал-сталь 1018» від температури навколишнього середовища

У практиці виконання ремонтів часто трапляються випадки, коли відновлювати обладнання доводиться восени за температури навколишнього середовища від 5 до 15°C. При цьому реакція полімеризації матеріалу сповільнюється і виникає питання щодо можливості навантаження відремонтованого вузла через 24 години, які вказані в технічній характеристиці матеріалу, як час набору матеріалом повної міцності. Природно, що зі зниженням температури вводити в дію відновлене обладнання можна з урахуванням збільшеного терміну набору міцності композитом. На підставі виконаних досліджень з матеріалом «мультиметал-сталь 1018» було побудовано графіки, представлені на рис. 3, що відображають зміну часу набору міцності матеріалу під час варіювання температури, які дали змогу запропонувати таку емпіричну залежність, що дає змогу визначити оптимальні терміни пуску в роботу відремонтованого обладнання [4]:

$$\sigma_T = 0,02 \cdot \exp(0,1 \cdot t) + \frac{360}{n}, \quad (1)$$

де σ_T – межа плинності матеріалу;

t – температура витримки, °C;

n – час витримки, доба.

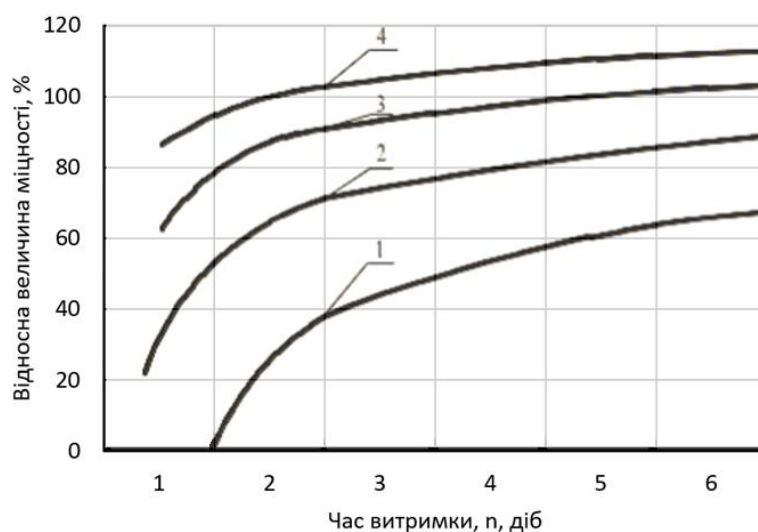


Рис. 3 – Залежність міцності мультиметалу від часу полімеризації за різних температур навколишнього середовища: 1 – температура повітря +5°C; 2 – температура повітря +10°C; 3 – температура повітря +15°C; 4 – температура повітря +20°C

Як видно з наведених графіків, за температур від 5 до 15 градусів час набору міцності йде в нескінченність, тобто застосовувати композит за таких температур недоцільно без використання спеціальних способів штучного підвищення температури шару композиту в період його полімеризації.

Адгезійна міцність у багатьох випадках визначає можливість застосування композитних матеріалів для різного виду ремонтних робіт. Під терміном адгезія слід розуміти явище, що полягає у виникненні фізичної або хімічної взаємодії між полімером і металом під час їхнього молекулярного контакту, що призводить до утворення нової гетерогенної системи адгезійного з'єднання.

Другий вживаний надалі термін – когезія – характеризує зчеплення частинок, що перебувають в одному агрегатному стані в металополімерному матеріалі, зумовлене утворенням зв'язків між складовими його молекулами, які призводять до об'єднання цих частинок в єдине ціле з найбільшою когезійною міцністю.

Величина адгезії вимірюється силою відриву на одиницю площі контакту пари матеріалів «полімер-метал». Однак за такого відриву можуть мати місце три випадки руйнування контакту зазначеної пари матеріалів. Перший із них характеризується чистим адгезійним руйнуванням, коли металополімер повністю відокремився від металу. Другий випадок руйнування називається когезійним, коли руйнування відбувається по масиву металополімеру або, що менш імовірно, по масиву металу. І, нарешті, третє, змішане руйнування відбувається як по масиву матеріалу, так і по лінії розділу матеріалів «композит-метал». Саме такий випадок найчастіше спостерігається на практиці.

Для оцінки адгезійної міцності металополімерних матеріалів у лабораторії кафедри МОЗЧМ ПДТУ були проведені дослідження, в яких використовували відомий метод рівномірного відриву із застосуванням статичних руйнівних навантажень. Випробування проводилися на розривній машині Р-20 з граничною силою розтягування 200 кН, швидкість переміщення повзунів становила 300 мм/хв, допустима похибка вимірювань $\pm 1\%$. Форма зразків, що застосовуються в експериментах, показана на рис. 4, а розмір становив 20 мм у вузькій частині та 25 мм у широкій частині. Загальна висота зразка – 45 мм. Зразки утримувалися під час випробувань спеціальними зчепленням з шарнірними пристроями, що запобігають впливу на зразки інших навантажень, окрім тих, що розтягують.

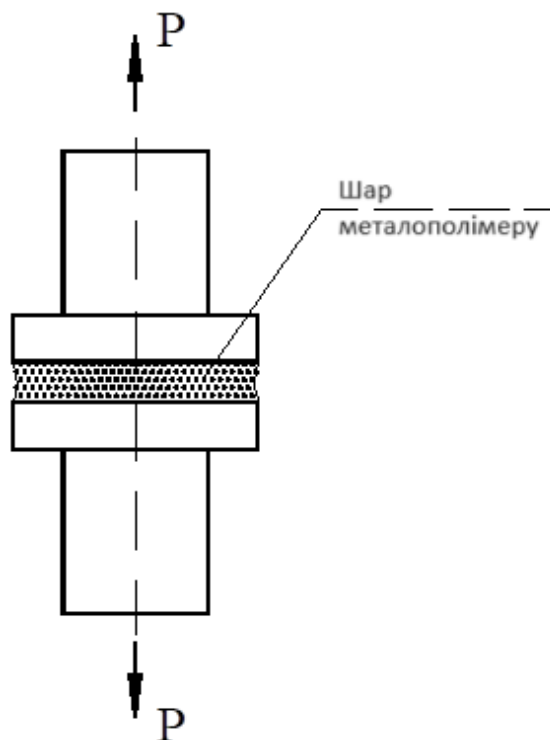


Рис. 4 – Форма зразків, що застосовуються у випробуваннях

Після зачищення контактних поверхонь зразків, їх знежирення і просушування на обидві з них наносили шляхом втирання шар металополімеру або пластикметалу, а потім зразки з'єднували, при цьому шар металополімеру становив від 0,9 до 1,1 мм.

Вплив способу зачищення та знежирення поверхні. Результати порівняння адгезійної міцності з'єднання зразків, контактна поверхня яких оброблялася в трьох варіантах: голкофрезою, наждачним кругом і торцевою фрезою, у разі використання одного й того самого матеріалу «мультиметал-сталь 1018» показали, що найкращі результати, що характеризуються середньою величиною 30 МПа, досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом. У разі обробки поверхні голкофрезою та торцевою фрезою адгезійна міцність знижується на 20-25% порівняно із зачисткою наждачним кругом.

Вплив застосовуваних очищувачів поверхні зразків дав змогу встановити, що вироблений фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany) очищувач порівняно з ацетоном дає незначне підвищення міцності адгезійного з'єднання на 5-10%, і тому в більшості випадків можна без великої шкоди для кінцевого результату ремонту виконувати знежирення поверхонь за допомогою ацетону. Водночас за відомостями фірми-виробника, фірмовий знежирювач гарантовано унеможливає виникнення центрів корозії під шаром металополімеру через певний час, чого не можна однозначно унеможливити під час використання вітчизняного ацетону. Тому під час виконання відповідальних ремонтних робіт доцільним є використання ацетону для попереднього знежирення поверхні (залежно від ступеня забрудненості, один або два рази), а лише потім виконання остаточного очищення фірмовим знежирювачем.

Вплив наявності на поверхні зразків забруднювальних речовин. Цікавим видається вплив на адгезійну міцність наявності на поверхні, наприклад, масляних плівок або води. За умови обов'язкового виконання умови зачищення поверхні незалежно від наявності олії або води і за умови обов'язкового втирання мультиметалу в поверхневий шар металу виявилось, що зниження адгезійної міцності відбувається в разі наявності оливної плівки (олія індустріальна 20) на 20-25% і в разі наявності води на 30-35%. Безумовно, в тих видах робіт, де адгезія відіграє визначальну роль, як, наприклад, у разі ремонту пошкоджень у газо- або нафтопроводах, таке зниження можна вважати значним і небажаним. Водночас у тих випадках, коли полімерний матеріал працює на стиск і адгезійна міцність не визначає довговічність конструкції, як, наприклад, під час відновлення гнізда підшипника, таке зниження є цілком допустимим, якщо не брати до уваги ймовірність появи центрів корозії на поверхні відновлюваної конструкції за наявності води в місці нанесення матеріалу.

Вплив ґрунтовки поверхні. Оскільки існує дві модифікації матеріалу мультиметал (пасто-подібний і рідиннотекучий), то дуже часто під час використання пастоподібного матеріалу не завжди якісно вдається виконати нанесення першого адгезійного шару через неможливість якісно втерти цей шар у поверхню зразка. Для поліпшення зчеплення першого шару з металом можливі два прийоми: перший – наносити перший шар із підігріванням матеріалу до 40-45°C. Такий нагрів робить пастоподібний мультиметал пластичнішим, що дає змогу виконати необхідні вимоги щодо втирання першого шару. Однак підігрівання не завжди можливе або зручне у виробничих умовах і тому застосовують як ґрунтовку під час нанесення першого адгезійного шару рідкотекучий мультиметал. Результати випробувань дали змогу встановити, що застосування мультиметалу рідиннотекучого як першого адгезійного шару підвищує адгезійну міцність з'єднання на 15-25%. Близький до цього результат дає і використання попереднього підігріву пастоподібного мультиметалу. Таким чином, у виробничих умовах для підвищення адгезійної міцності може бути використаний один із названих прийомів, залежно від наявності мультиметалу рідиннотекучого або можливості підігріву мультиметалу пастоподібного.

Питання адгезійної міцності композитів класу мультиметал були порушені також у роботі [5]. У ній, зокрема, зроблено дуже важливі для практичного застосування висновки. Наприклад, тривала перерва між операціями знежирення і нанесення матеріалу може знизити адгезійну міцність майже у 2 рази. Тому пропонується не виходити за рамки двогодинного інтервалу між знежиренням і нанесенням полімерного матеріалу. Оскільки в роботі, яку ми розглядаємо, випробування адгезійної міцності виконували шляхом докладання зсувного зусилля, цікавою видається зміна співвідношення адгезійної та когезійної міцності в міру збільшення шорсткості зразків. Було встановлено, що чим більша шорсткість поверхні, тим більший вплив на зусилля зрізу має когезійна складова. Тому під час виконання ремонтних робіт доцільним видається обрання такої

схеми відновлення, за якої полімерний матеріал працюватиме не на відрив, а на зріз, і в цьому разі збільшення шорсткості поверхні, безумовно, відіграватиме важливу роль у забезпечення міцності утвореного з'єднання «металополімер-метал».

Для того, щоб ще більше збільшити адгезію такого з'єднання, в роботах [9], [10] пропонується виконувати фосфатування металевої поверхні. Фосфатні шари на поверхні металу хімічно з ним пов'язані та складаються зі зрощених між собою металевих кристалів, які можуть утворювати розвинену шорстку поверхню. Фізико-хімічні та адгезійні властивості фосфатних шарів зумовлюють високу здатність поверхонь адсорбувати та поглинати металополімерні композиції, що наносяться на них. Як було встановлено дослідженнями після попередньої абразивної обробки та фосфатування адгезійна міцність з'єднання збільшується на 30-40% [9], [10].

Висновки

Висновки з проведених досліджень дозволяють зробити наступні рекомендації:

1. Для забезпечення надійності з'єднань композитів необхідно дотримуватись певних умов відносної вологості та температури.
2. Найкращі результати адгезійної міцності досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом та знежирення поверхні фірмовим знежирювачем.
3. Для підвищення адгезійної міцності рекомендується використовувати рідкотекучий мультиметал як перший адгезійний шар або підігрівати пастоподібний мультиметал.

This research was carried out within the framework of the joint project «Development of technology for the protection and restoration of hydropower equipment with the latest domestic composite materials» under grant number 01DK24021, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine and the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF). The project is being implemented as part of a measure to support joint Ukrainian-German research projects for implementation in 2024-2025.

Перелік використаних джерел:

1. Madrid M., Turunen J., Seitz W. General industrial adhesive applications: Qualification, specification, quality control, and risk mitigation. *Advances in Structural Adhesive Bonding*. 2-nd ed. Woodhead Publishing, 2023. Pp. 849-876. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91214-3.00023-5>.
2. Weir Minerals. Launches New Zero VOC Adhesive Range for Rubber Lining. URL: <https://www.global.weir/newsroom/news-articles/weir-minerals-launches-new-zero-voc-adhesive-range-for-rubber-lining/> (дата звернення: 15.05.2024).
3. Спосіб відновлення опорної поверхні важконавантажених машин: пат. 41759 Україна: МПК B05D3/12. №2001031777; А. О. Іщенко, О. В. Іщенко; заявл. 16.03.01; опубл. 15.02.05, Бюл. № 2. 4 с.
4. Спосіб відновлення опорної поверхні важконавантажених металургійних машин: пат. 4804 Україна: МКИ B05D3/12. №20040402991; А. О. Іщенко, В. П. Гришко, І. А. Калініченко, І. К. Єфимов; заявл. 22.04.04; опубл. 15.02.05, Бюл. № 2. 4 с.
5. Визначення можливості використання компаундів фірми «Діамант-адгезив» під час ремонту суднових технічних засобів. Звіт ПІВДЕНДІМФ. Одеса, 1997. 97 с.
6. Tao R., Alfano M., Lubineau G. Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 109. Pp. 84-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.041>.
7. Czarnecki J. V., Wetzel M., Dolderer D., Eisenschink C. The Use of Peel Ply as a Method to Create Reproducible But Contaminated Surfaces for Structural Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastics / J. Holtmannspötter et al. *The Journal of Adhesion*. 2013. Vol. 89(2). Pp. 96-110. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2012.731828>.
8. Katnam K. B., Da Silva L. F. M., Young T. M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences*. 2013. Vol. 61. Pp. 26-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.03.003>.

9. Штекель Л. И. Полимерная «холодная» сварка. Современные методы ремонта судового оборудования с использованием полимерных материалов. Одесса: Студия «Негоциант», 2003. 132 с.
10. Визначення механічних характеристик ремонтних полімерних матеріалів / Іщенко А. О., Гришко В. П., Єфімов І. К., Молнар Л. *Захист металургійних машин від поломок*. 2005. Вип. 8. С. 93-98.

References:

1. M. Madrid, J. Turunen, and W. Seitz, «General industrial adhesive applications: Qualification, specification, quality control, and risk mitigation», in *Advances in Structural Adhesive Bonding*, 2-nd ed., Woodhead Publishing in Materials, 2023, pp. 849-876. doi: 10.1016/B978-0-323-91214-3.00023-5.
2. Weir Minerals. Launches New Zero VOC Adhesive Range for Rubber Lining [Online]. Available: <https://www.global.weir/newsroom/news-articles/weir-minerals-launches-new-zero-voc-adhesive-range-for-rubber-lining/>. Accessed on: May 15, 2024.
3. A.O. Ishchenko, and O.V. Ishchenko, «Sposib vidnovlennja opornoї poverhni vazhkonavantazhenih mashin» [«Method of restoring the bearing surface of heavily loaded machines»], *Patent 41759 UA Appl. 2001031777*, Feb. 15, 2005. (Ukr.)
4. A.O. Ishchenko, V.P. Grishko, I.A. Kalinichenko, and I.K. Efimov, «Sposib vidnovlennja opornoї poverhni vazhkonavantazhenih metalurgijnih mashin» [«Method of restoring the bearing surface of heavily loaded metallurgical machines»], *Patent 4804 UA Appl. 20040402991*, Feb. 15, 2005. (Ukr.)
5. «Vyznachennia mozhyvosti vykorystannia kompaundiv firmy «Diamant-adhezyv» pid chas remontu sudnovykh tekhnichnykh zasobiv» [«Determining the possibility of using compounds from the company «Diamant-adhesive» during the repair of ship technical equipment»], Southern Research Institute of the Marine Fleet, Odessa, Ukraine, Report, 1997. (Ukr.)
6. R. Tao, M. Alfano, and G. Lubineau, «Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 109, pp. 84-94, 2018. doi: 10.1016/j.compositesa.2018.02.041.
7. J. Holtmannspötter, J.V. Czarnecki, M. Wetzels, D. Dolderer, and C. Eisenschink, «The Use of Peel Ply as a Method to Create Reproducible but Contaminated Surfaces for Structural Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastics», *The Journal of Adhesion*, vol. 89, no. 2, pp. 96-110, 2013. doi: 10.1080/00218464.2012.731828.
8. K. B. Katnam, L. F. M. da Silva, and T. M. Young, «Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities», *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 61, pp. 26-42, 2013. doi: 10.1016/j.paerosci.2013.03.003.
9. L.Y. Shtekel, *Polymernaia «kholodnaia» svarka. Sovremennye metody remonta sudovoho oborudovaniya s ispolzovaniem polimernykh materiyalov* [Polymer «cold» welding. Modern methods of repair of ship equipment using polymer materials]. Odessa, Ukraine: Studio «Negoziant», 2003. (Rus.)
10. A.A. Ishchenko, V.P. Grishko, I.K. Efimov, and L. Molnar, «Vyznachennia mekhanichnykh kharakterystyk remontnykh polimernykh materialiv» [«Determination of mechanical characteristics of repair polymer materials»], *Zashhita metallurgicheskikh mashin ot polomok – Zakhyst metalurhiynykh mashyn vid polomok*, vol. 8, pp. 93-98, 2005. (Rus.)

Стаття надійшла 28.05.2024

Стаття прийнята 18.06.2024

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.162.24:621.928.2

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321237

© Засельський В.Й.¹, Пополов Д.В.²**ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ДИНАМІЧНОГО СТАНУ ЖОРСТКОЇ СІЯЧОЇ ПОВЕРХНІ,
ДІЮЧОЇ В ВІБРАЦІЙНО-УДАРНОМУ ПОЛІ**

У статті досліджується динамічний стан жорсткої сіячої поверхні, яка працює у вібраційно-ударному полі. Проведені лабораторні дослідження дозволили отримати емпіричну залежність часу несталого руху від прискорень коливань коробу в діапазоні 18...47 м/с². Встановлено, що зі збільшенням прискорення коливань швидкість руху та амплітуда переміщення матеріальної точки сіячої поверхні зростають до певного діапазону, після якого спостерігається уповільнення змін досліджуваних параметрів. Також виявлено, що точки сіячої поверхні в завантажувальній та розвантажувальній частинах знаходяться в протифазі, що свідчить про поворотне-обертальний характер її руху. Отримані результати підтверджують адекватність розробленої розрахункової моделі та дозволяють зробити висновки щодо оптимізації процесу грохочення.

Ключові слова: коливання, вібраційно-ударне поле, сіяча поверхня, вільно укладена поверхня, голопування, режим.

V. Zaselskyi, D. Popolov. Laboratory studies of the dynamic state of a rigid sieving surface operating in a vibrational-impact field. The article investigates the dynamic behavior of a rigid sieving surface operating within a vibrational-impact field. Granulometric composition is a critical parameter in energy-efficient processes, such as sintering and smelting in metallurgy. Given the increasing costs of energy resources, enhancing the screening process of bulk materials has become a priority. This necessitates the development of advanced machines capable of ensuring effective material preparation for subsequent metallurgical processes. The research highlights limitations of current technologies, including metal sieves with circular or square openings, which offer a low effective screening area (35-40%) and achieve an efficiency of only 55%. Polymer sieves, although advantageous for reducing clogging, fail under high temperatures and suffer from reduced reparability and operational lifespan. The primary objective of the research is to determine the dynamic characteristics of a rigid sieving surface when subjected to vibrational and impact loading. A laboratory-scale vibrational-impact setup was developed, emulating the operational conditions of standard industrial screens. The system consisted of key components, including a manually controlled hopper, vibrating carriage, adjustable sieving frame, and accelerometers for precise measurement. Experiments were conducted across a range of vibration accelerations (18...47 m/s²) at fixed amplitudes, with frequency adjustments ensuring controlled testing conditions. Data from the sieving surface were recorded using high-precision sensors, followed by advanced statistical analysis. Results revealed that the acceleration distribution of the sieving surface deviates from a normal distribution, exhibiting asymmetry. Consequently, the interquartile range was used for outlier detection instead of the standard deviation. Oscillographic analysis of acceleration dynamics highlighted two

¹ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-7517-5433, zaselskyi_vy@duet.edu.ua

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0003-0347-8627, dmitrykr@ukr.net

distinct zones: transient motion and steady-state motion. The study established an empirical power-law relationship between the reduction in transient motion time and increased vibration acceleration. Furthermore, findings demonstrated that higher vibration accelerations increase the average acceleration, velocity, and displacement amplitude of the sieving surface. However, beyond a threshold of 33 m/s^2 , these parameters exhibited a decelerating growth rate, indicating diminishing returns. Additionally, dynamic analysis of motion in the sieving surface revealed that points in the loading and unloading zones move in antiphase, confirming a rotational-oscillatory motion pattern. This motion transforms into a reciprocating linear trajectory as the energy input increases. The empirical results validate earlier theoretical models, with experimental errors averaging 8.5%, proving the reliability of the proposed dynamic model. The research outcomes offer valuable insights into optimizing the design and operation of rigid sieving surfaces for vibrational-impact screening systems. The derived dependencies and dynamic behavior trends can guide the engineering of more efficient screening equipment, improving the energy efficiency of material preparation processes in metallurgical industries.

Keywords: vibrations, vibrational-impact field, sieving surface, freely laid surface, galloping, mode.

Постановка проблеми. Одним з визначальних параметрів, що зумовлює енергоефективність технологічних процесів спікання та плавки в металургійній галузі, є гранулометричний склад шихти. У зв'язку з цим, в сучасних умовах постійного зростання цін на енергоносії, особливу увагу приділяють пошуку шляхів підвищення ефективності процесу грохочення сипких матеріалів. Виникає необхідність у розробці та створенні високоефективних машин і засобів, котрі були б спроможні забезпечити якісну підготовку сировини до подальшого її використання в металургійному переділі [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час в якості сіячої поверхні для грохочення залізовмісної сировини, коксу та вапняку використовують головним чином металеві листи з квадратними, круглими та щілиними отворами. Коефіцієнт живого перерізу таких сит знаходиться в діапазоні 35...40% [3], а ефективність грохочення не більше 55%, що не відповідає вимогам по відсіву дрібних класів, які впливають на газодинамічні процеси при спіканні і плавці [4, 5].

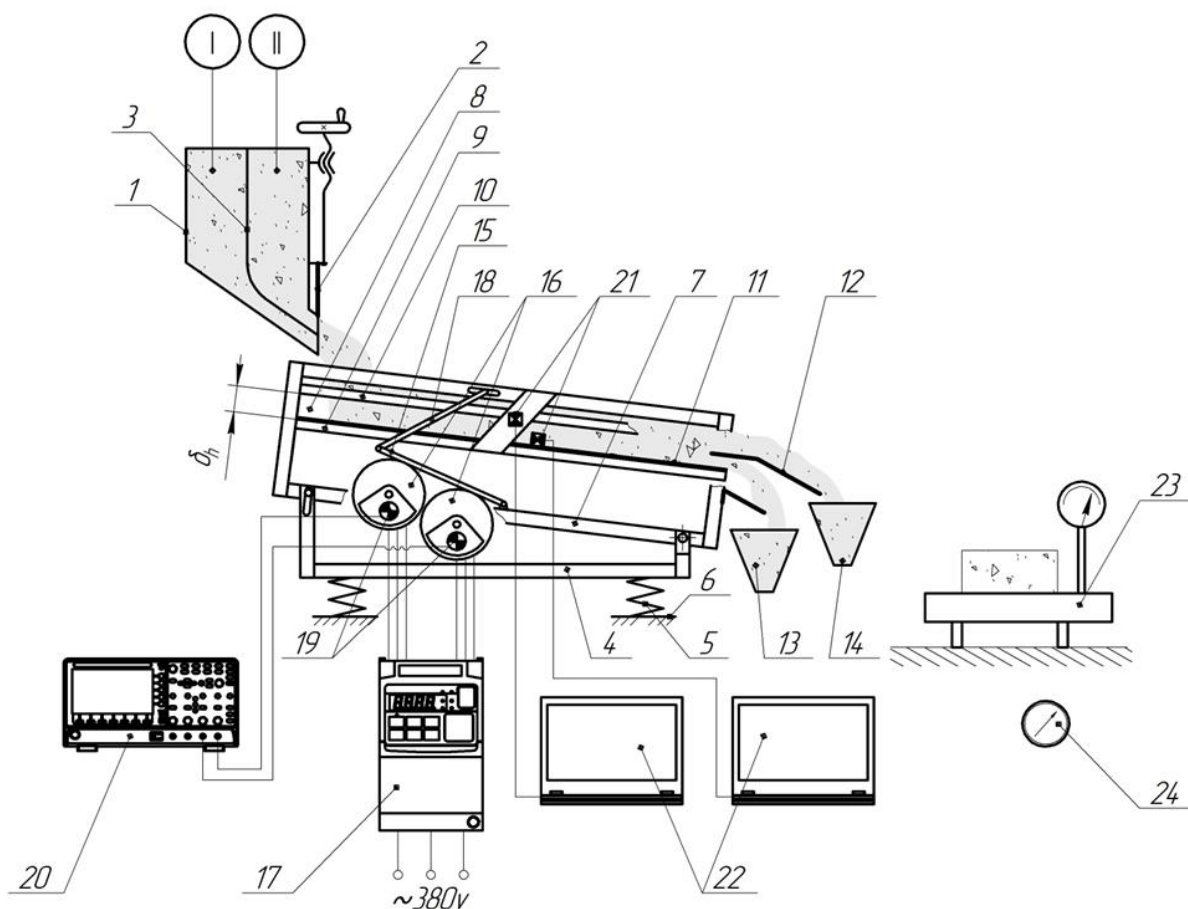
Окрім металевих сит, для інтенсифікації процесу грохочення за рахунок зменшення забивання отворів сіячої поверхні, в технологічних операціях металургійного виробництва використовують листові полімерні сита, які не вирішують проблеми при грохоченні матеріалів з високою температурою, яка отримана після їх спікання. Також листові полімерні сита характеризуються низькими показниками ремонтпридатності та працездатності у випадках локального зношення або розриву, що зумовлено їхніми великими габаритними розмірами [6]. Останнім часом значного поширення набули дослідження та впровадження динамічне активних сіячих поверхонь, виготовлених з полімерне-армованих матеріалів у вигляді стрічок, струн, тросів тощо. Проте ефективність таких поверхонь значною мірою залежить від навантаження матеріалом, який на них діє, а також від температурних умов. У деяких випадках, наприклад, під час обробки гарячого агломерату, температура може досягати 1000°C [7-10].

Тому дослідження динамічного стану жорсткої сіячої поверхні, що працює у вібраційно-ударному полі, з метою зменшення її забивання та інтенсифікації процесу грохочення є актуальним і важливим завданням.

Мета статті – отримати динамічні характеристики жорсткої сіячої поверхні на основі досліджень її роботи у вібраційно-ударному полі.

Виклад основного матеріалу. Лабораторна установка вібраційно-ударної дії з вільно укладеною сіячою поверхнею розроблялась на основі фізичної подібності найбільш поширеному типорозміру грохотів для розсіву агломерату ГА-41М. Масштабні коефіцієнти переходу від моделі до натури і навпаки визначались з урахуванням теорії розмірності [11].

На рис. 1 представлена структурна схема лабораторної установки для досліджень роботи жорсткої сіячої поверхні у вібраційно-ударному полі з використовуваною апаратурою, що реєструє необхідні динамічні показники технічної системи.



дебалансів мотор-вібраторів 16 контролювалась за допомогою фазових датчиків 19, сигнал від котрих надходив до багатоканального цифрового осцилографа DS1054 20. Для визначення величини коливань рами та сіячої поверхні використовувались датчики прискорення 21, сигнал яких поступав до лентопіс 22, де за допомогою програмного продукту відбувалась його обробка в тривимірній системі координат.

Досліди проводились при прискореннях коливань коробу $A \cdot \omega^2 = 18 \dots 47 \text{ м/с}^2$, причому кожне значення прискорення отримували при постійній амплітуді ($A = 0,003 \text{ м}$) підбором відповідної величини частоти коливань ω . Для кожного значення динамічних параметрів коробу вимірювалось прискорення сіячої поверхні $\frac{d^2y(t)}{dt^2}$ в одиницю часу датчиком 21, розташованим в її центрі мас, при направлених коливаннях робочого органу під кутом вібрації $\beta = 40^\circ$ до нормалі, проведеної до опорної поверхні підситника в подовжній площині. Також під час проведення дослідів контролювалась самосинхронізація мотор-вібраторів 16 за рахунок виміру розфазування дебалансів фазовими датчиками 19, що передавали сигнал на осцилограф 20.

Отриманий масив даних піддався статистичному аналізу, в результаті котрого визначався характер динамічного стану жорсткої сіячої поверхні в вібраційно-ударному полі. На рис. 2 наведені отримані гістограми розподілення значень прискорення коливань сіячої поверхні при всіх динамічних навантаженнях короба.

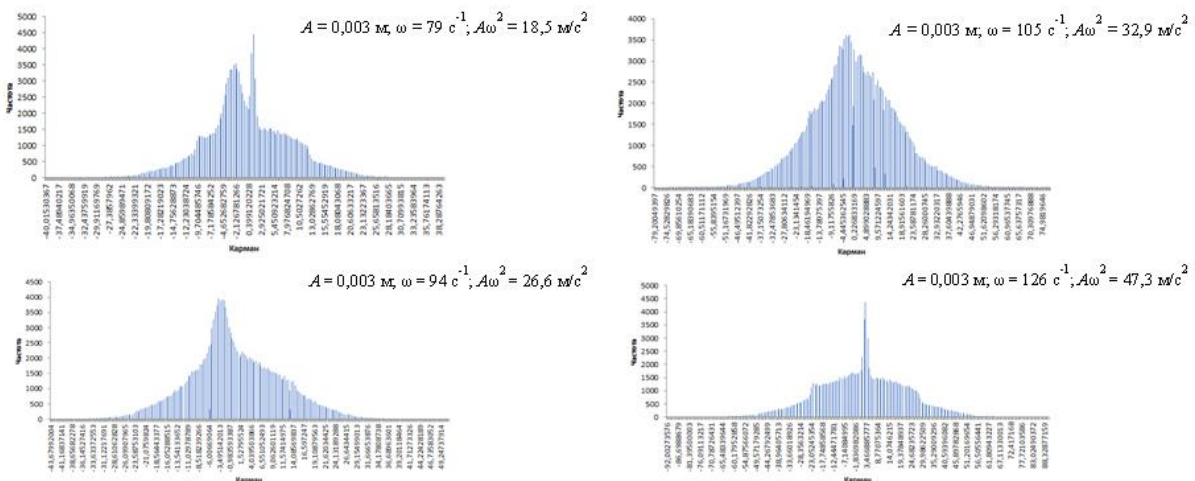


Рис. 2 – Гістограма розподілення

З отриманих гістограм видно, що закон розподілення прискорень відрізняється від нормального та має асиметричний характер, тому для оцінки аномальних значень використання середньоквадратичного відхилення не доцільне через велику чутливість до викидів. У зв'язку з цим, як альтернатива, був використаний міжквартильний розмах, котрий є непараметричною оцінкою, тому не потребує припущень щодо розподілення, який визначався за формулою

$$IQR = Q_3 - Q_1, \quad (1)$$

де Q_3 та Q_1 – третій та перший квартилі відповідно [12].

Значення прискорення коливань сіячої поверхні виключались з масиву як викид, якщо не виконувалась умова [13]

$$Q_1 - 1,5 \cdot IQR \leq \frac{d^2y(t)}{dt^2} \leq Q_3 + 1,5 \cdot IQR. \quad (2)$$

За результатами обробки масиву даних були отримані осцилограми виміру прискорення сіячої поверхні (рис. 3) для кожного вищезазначеного динамічного параметру коробу. На отриманих осцилограмах можна виділити дві характерні зони, які відповідають етапам несталого ($t_{н.р}$) та усталеного руху сіячої поверхні.

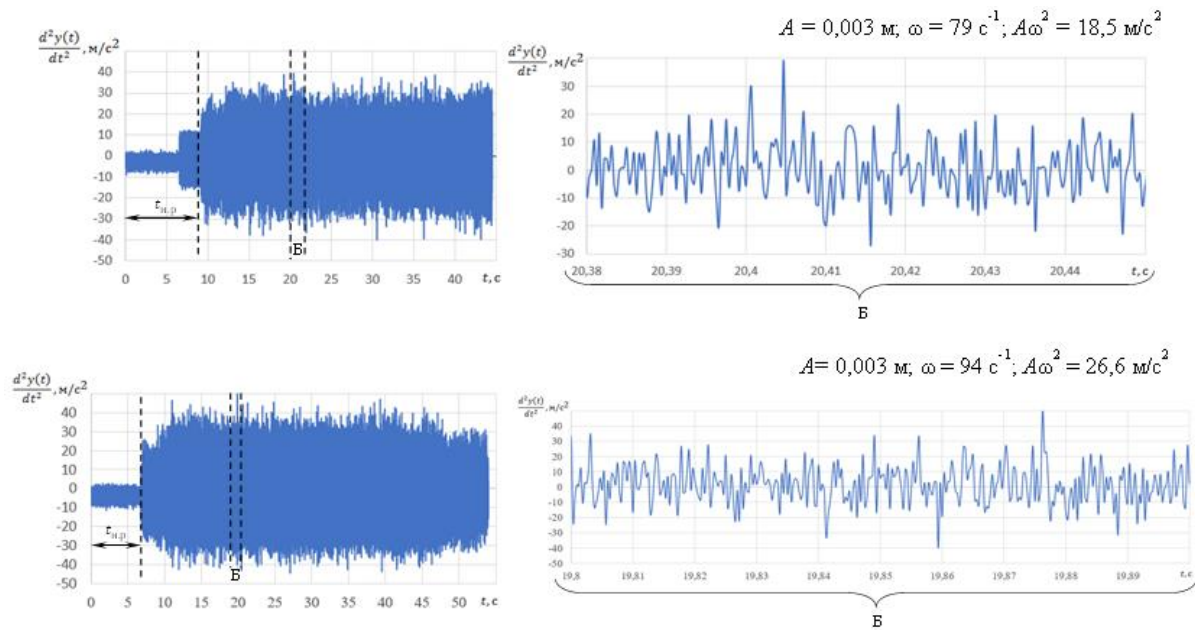


Рис. 3 – Осцилограми виміру прискорення сіячої поверхні

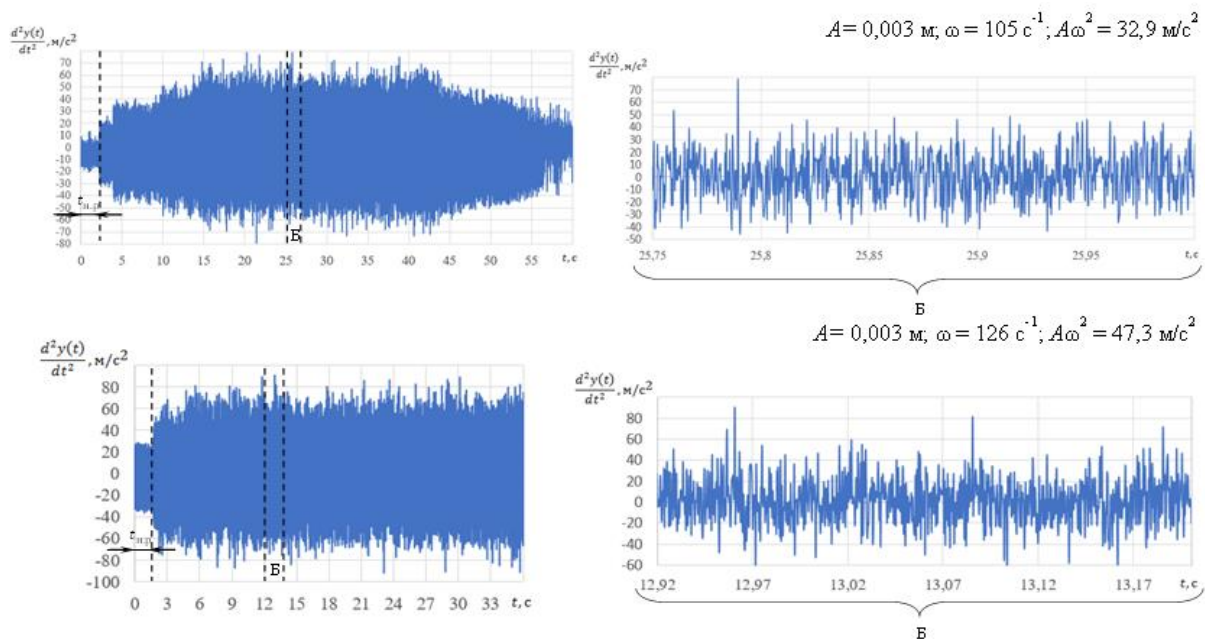


Рис. 3 – аркуш 2

Порівняльний аналіз часу несталого руху сіячої поверхні в просторі, утвореним швелеро-подібним підситником, (див. рис. 4) отриманого раніш розрахунковим методом ($\widehat{t_{н.р}}$), використовуючи емпіричну залежність

$$\widehat{t_{н.р}} = 15,565 \cdot (A \cdot \omega^2)^{-1,506} \text{ с}, \quad (3)$$

де A – амплітуда коливань коробу, м; ω – кругова частота коливань коробу, с^{-1} , та підчас натурних випробувань ($t_{н.р}$) показав, що зі збільшенням частоти коливань коробу він зменшується за степеневим законом в межах дослідженої області прискорень від 18 до 47 м/с^2 .

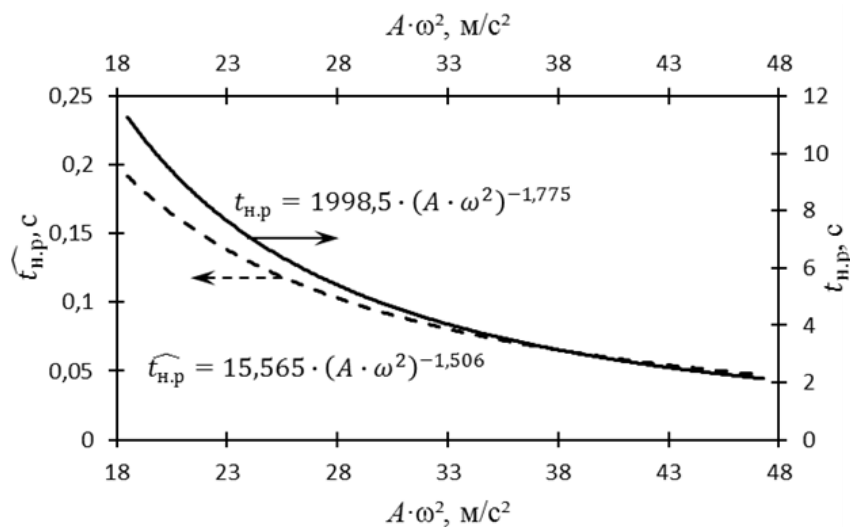


Рис. 4 – Залежність часу несталоного руху сіячої поверхні від прискорення коливань корпусу

Не зважаючи на підтвердження закону зміни часу несталоного руху сіячої поверхні в залежності від динамічних параметрів корпусу, отримане його розрахункове значення значно менше за натурне. Це обумовлено особливостями динаміки перехідних рухів самосинхронізуючих вібраційних машин, дисипації механічної енергії системи, що може розглядатись як окрема наукова задача. Тому для інженерних розрахунків з достатнім ступенем точності можна використовувати скореговану емпіричну залежність часу несталоного руху сіячої поверхні від прискорення коливань корпусу в межах вищезазначеної області визначення функції

$$t_{н.р} = 1998,5 \cdot (A \cdot \omega^2)^{-1,775} \text{ с.} \quad (4)$$

Для перевірки адекватності запропонованого математичного опису руху сіячої поверхні, вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, шляхом порівняльної оцінки раніш теоретично розрахованих її кінематичних та динамічних параметрів від кінематичних та динамічних параметрів корпусу з аналогічними показниками, отриманими на фізичній моделі, розглядався діапазон «Б» усталеного руху сіячої поверхні, яка включала максимальні значення прискорень її коливань (див. рис. 3). Виділений діапазон «Б» має значний рівень шуму, тому для можливості подальшої його обробки виконувалось згладжування даних, використовуючи функцію, яка реалізує адаптивний алгоритм, заснований на аналізі взаємного розташування точки, що розглядається, і найближчих до неї [14]. Після чого виконувалась інтерполяція даних та інтегрування отриманої функції в часі, були побудовані функції середнього прискорення, швидкості та переміщення матеріальної точки сіячої поверхні в залежності від прискорення коливань корпусу, отримані на підставі розрахункових даних та натурних вимірів (рис. 5).

Аналіз отриманих функцій показує, що зі збільшенням прискорення коливань корпусу середнє прискорення, швидкість руху та амплітуда переміщення матеріальної точки сіячої поверхні збільшуються. Стале зростання зазначених параметрів відбувається в діапазоні прискорень корпусу від 18,5 до 33 м/с², після подолання котрого з'являється уповільнення зміни досліджуваних параметрів. Похибка між відповідними значеннями, отриманими на основі розрахунків та натурних вимірів, склала в середньому 8,5%, що свідчить про адекватність розробленої розрахункової моделі динамічних показників вільно укладеної сіячої поверхні.

Для підтвердження достовірності раніше проведених теоретичних досліджень щодо форми руху сіячої поверхні, вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях корпусу в завантажувальній та розвантажувальній частинах сита лабораторної моделі встановлювались датчики прискорення 21. За результатами серії дослідів, які проводились у вищезазначеному діапазоні прискорень, були отримані закони переміщення точок сіячої поверхні, які наведені на рис. 6.

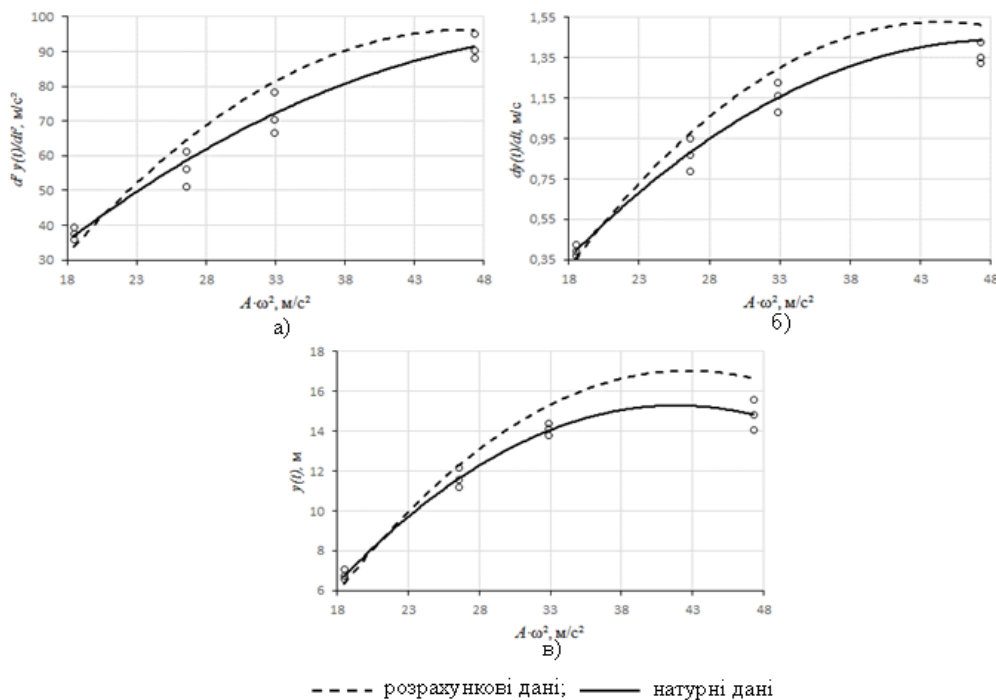


Рис. 5 – Функція середнього прискорення (а), середньої швидкості (б) та переміщення (в) матеріальної точки сіячої поверхні в залежності від прискорення коливань коробу

З отриманих осцилограм видно, що переміщення точок завантажувальної та розвантажувальної частин сіячої поверхні знаходяться у протифазі, яка підтримується на всьому діапазоні прискорень коливань коробу та незначною мірою зміщується в напрямку синфазності при їх збільшенні. Такі результати свідчать, що поворотне-обертальний (голопуючий) рух вільно укладеної сіячої поверхні при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях коробу є переважальним, а збільшення енергетики процесу призводить до переходу на зворотно-поступальну форму руху.

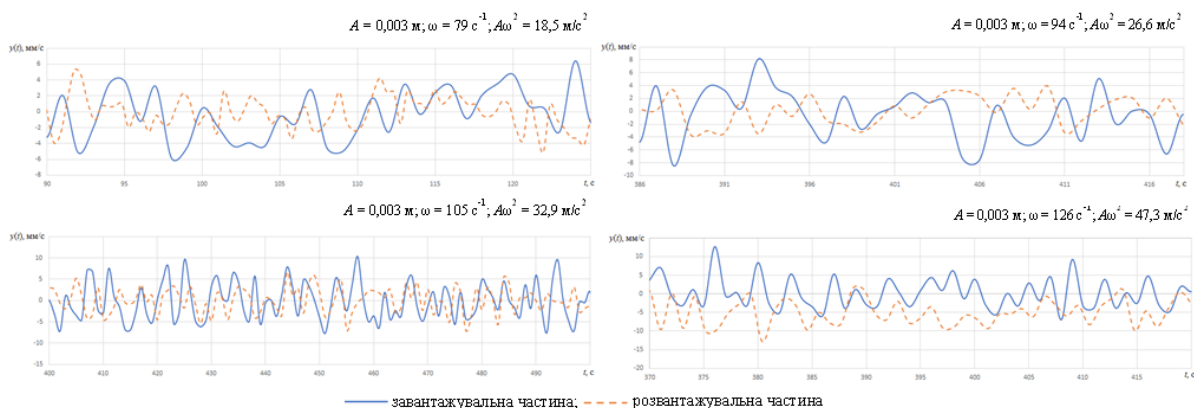


Рис. 6 – Закон переміщення точок сіячої поверхні

Висновки

В результаті проведених досліджень динамічного стану жорсткої сіячої поверхні, діючої в вібраційно-ударному полі, на розробленій лабораторній установці отримана емпірична залежність часу несталої її руху від прискорень коливань коробу в діапазоні 18...47 m/s^2 , встановлено, що зі збільшенням частоти коливань коробу час несталої руху сита зменшується за

степеневим законом. Окрім цього, визначено, що зі збільшенням прискорення коливань коробу, швидкість руху та амплітуда переміщення матеріальної точки сіячої поверхні збільшується, маючи сталі зростання в діапазоні прискорень від 18,5 до 33 м/с², після подолання котрого з'являється уповільнення досліджуваних параметрів. Також отримані траєкторії переміщення точок сіячої поверхні в діапазоні прискорень коливань коробу від 1,8g до 4,7g, які показують, що в завантажувальній та розвантажувальній частинах сіячої поверхні точки знаходяться в протифазі одна до одної, це вказує на поворотне-обертальний (голопуючий) її рух при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях коробу.

Перелік використаних джерел:

1. Товаровский И. Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. № 28. С. 117-131.
2. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке: монография / В.Г. Гусак та ін. Киев : Наукова думка, 2011. 216 с.
3. Учитель С. А., Лялюк В. П., Пополов Д. В. Сортировка металлургических шихт на вибрационных грохотах. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014. 413 с.
4. Бергеман Г. В., Пелых И. В., Петренко В. А. Проблемы калибровки металлургического минерального сырья – известняка. *Металл и литье Украины*. 2008. № 5. С. 5-8.
5. Берник П. С., Омелянов О. Н., Паламарчук И. П. Разработка виброгрохота с пространственными колебаниями рабочих органов. *Вибрации в технике и в технологиях*. 1998. № 2(6). С. 8-13.
6. Складоновский Е. Н., Баланов В. Г., Нехаев Г. Е. Коксовый грохот с резиновыми ситами. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1990. № 4. С. 68-69.
7. Dynamic Characteristics of a Vibrating Flip-Flow Screen and Analysis for Screening 3 mm Iron Ore / C. Yu et al. *Shock and Vibration*. 2020. Vol. 2020. P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/1031659>.
8. Slepyan L. I., Slepyan V. I. Coupled mode parametric resonance in a vibrating screen model. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014. Vol. 43, no. 1-2. P. 295–304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.10.001>.
9. Засельский В. И., Зайцев Г. Л., Китаев Е. И. Промышленные исследования работы резонирующих просеивающих поверхностей. *Теория и практика металлургии*. 2009. № 5-6. С. 15-18.
10. Повышение эффективности классификации кокса за счет использования активных рабочих поверхностей виброгрохотов / Потураев В. Н., Надутый В. П., Гольдин А. А., Бараненко В. Д. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1991. № 2. С. 48-49.
11. 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>.
12. Upton G., Cook I. Understanding statistics. Oxford University Press, 2003. 657 p.
13. Moore D. S. Introduction to the practice of statistics. 6th ed. New York : W. H. Freeman and Company, 2009. 166 p.
14. Maxfield B. Engineering with mathcad. Great Britain: Elsevier, 2006. 494 p.

References:

1. I.G. Tovarovsky, «Normativnaia otsenka vliyaniya parametrov domennoi plavky na raskhod koksa y proyzvodyelnost» [«Normative estimation of influence parameters for blast furnace coke consumption and productivity»], *Fundamentalnye y prykladnye problemi chernoi metallurhyi – Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, no. 28, pp. 117-131, 2014. (Rus.)
2. V.H. Husak, A.M. Kuznetsov, A.V. Emchenko, V.E. Popov, and A.V. Kuzyn, *Teoriya y praktyka podhotovky metallurhycheskoho koksa k domennoi plavke: monohrafiya* [Theory and Practice of Preparing Metallurgical Coke for Blast Furnace Smelting: Monograph]. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 2011. (Rus.)
3. S.A. Uchitel, V.P. Lialyuk, and D.V. Popolov, *Sortyrovka metallurhycheskykh shykht na vybratsyonnykh hrokhotakh* [Sorting of metallurgical charge materials on vibrating screens]. Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2014. (Rus.)

4. G.V. Bergeman, I.V. Pelykh, and V.A. Petrenko, «Problemi kalybrovki metallurhicheskogo myneralnoho siria – yzvestniaka» [«Issues of calibrating metallurgical mineral raw materials – limestone»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, no. 5, pp. 5-8, 2008. (Rus.)
5. P.S. Bernik, O.N. Omelyanov, and I.P. Palamarchuk, «Razrabotka vybrohrokhota s prostranstvennyy kolebanyamy rabochykh orhanov» [«Development of a vibrating screen with spatial oscillations of working elements»], *Vybratsyy v tekhnike y v tekhnolohiyakh – Vibrations in Engineering and Technology*, no. 2(6), pp. 8-13, 1998. (Rus.)
6. E.N. Skladonovsky, V.G. Balanov, and G.E. Nekhaev, «Koksovii hrokhota s rezynovimy sytamy» [«Coke screen with rubber sieves»], *Metallurhicheskaya y hornorudnaya promishlennost – Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 68-69, 1990. (Rus.)
7. C. Yu, X. Wang, K. Pang, G. Zhao, and W. Sun, «Dynamic Characteristics of a Vibrating Flip-Flow Screen and Analysis for Screening 3 mm Iron Ore», *Shock and Vibration*, vol. 2020, pp. 1-12, 2020. doi: 10.1155/2020/1031659.
8. L.I. Slepian, and V.I. Slepian, «Coupled mode parametric resonance in a vibrating screen model», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 43, no. 1-2, pp. 295-304, 2014. doi: 10.1016/j.ymssp.2013.10.001.
9. V.I. Zaselsky, G.L. Zaitsev, and E.I. Kitach, «Promishlennye issledovaniya raboti rezoniruyushchykh proseyvaiushchykh poverkhnostey» [«Industrial Studies on the Performance of Resonating Sieving Surfaces»], *Teoriya y praktika metallurhyy – Theory and Practice of Metallurgy*, no. 5-6, pp. 15-18, 2009. (Rus.)
10. V.N. Poturaev, V.P. Naduty, A.A. Goldin, and V.D. Baranenko, «Povisheniye effektivnosti klassyfykatsyy koksa za schet yspolzovaniya aktivnykh rabochykh poverkhnostey vybrohrokhotov» [«Improving the efficiency of coke classification through the use of active working surfaces of vibrating screens»], *Metallurhicheskaya y hornorudnaya promishlennost – Metallurgical and Mining Industry*, no. 2, pp. 48-49, 1991. (Rus.)
11. S.G. Longo. Principles and Applications of Dimensional Analysis and Similarity. Parma, Italy: Springer Cham, 2021. 428 p. doi: 10.1007/978-3-030-79217-6.
12. G. Upton, and I. Cook, *Understanding Statistics*. USA: Oxford University Press, 2003.
13. D.S. Moore, *Introduction to the Practice of Statistics*, 6th ed. New York, USA: W.H. Freeman and Company Publ., 2009.
14. B. Maxfield, *Engineering with Mathcad*. Great Britain: Elsevier, 2006.

Стаття надійшла 18.11.2024

Стаття прийнята 03.12.2024

УДК 622.781

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321239

© Чупринов Є.В.¹, Кассім Д.О.², Швед С.В.³, Реков Ю.В.⁴

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОКАТИШІВ ДЛЯ МЕТАЛІЗАЦІЇ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ РОЗМІРОМ ДОННОЇ І БОРТОВОЇ ПОСТІЛІ

Відмічено, що істотним резервом покращення процесів термозміцнення окатишів є удосконалення газодинамічних процесів, що відбуваються в шарі окатишів, та

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-1750-1237, kassim@duet.edu.ua

³ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0003-2169-8893, shved_sv@duet.edu.ua

⁴ канд. техн. наук, доцент, Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0009-0006-0318-0168, yuriy.rekov@mipolytech.education

проаналізовані останні роботи, присвячені цьому напрямку. Розроблена технологія, сутність якої полягає в тому, що в якості донної і бортової постілі використовуються тільки окатиші діаметром на 1-3 мм більше максимального діаметру придатної фракції обпалених окатишів. Проведені лабораторні дослідження щодо відпрацювання запропонованої технології. З підготовленої шихти виготовляли сирі окатиші крупністю, що забезпечувало отримання з них обпалених окатишів фракції 9-15 мм і виділення з них донної і бортової постілі +15 мм. Результати досліджень показали, що питома продуктивність обпалювального агрегату при термозміцненні сирих окатишів за розробленою технологією практично не відрізняється від прийнятої в промисловості, проте міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за запропонованою технологією, істотно краще, ніж за існуючими.

Ключові слова: залізородні окатиші, металізація, донна і бортова постіль, термозміцнення, міцність, відновлення, доменна піч.

Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim, S.V. Schved, Yu.V. Rekov. Improving the quality of pellets for metallization by controlling the size of the bottom and side bed. It was noted that the improvement of the gas dynamic processes occurring in the layer of pellets is a significant reserve for the improvement of the processes of thermal strengthening of the pellets and the latest works devoted to this direction were analyzed. The experience of foreign enterprises has confirmed that the use of pellets of a slightly larger size for the formation of the bottom and side beds improves the metallurgical characteristics of the finished products. An improvement of the overall gas-dynamic picture of the process due to the optimization of the bed size was noted. The closest technological solution to the separation of the bottom and side beds was analyzed, in which the fired pellets, the average diameter of which exceeds the average diameter of the raw pellets by 1.08-1.75 times, are isolated. The found drawback of this technology is that when using this method at a minimum factor of 1.08, the average bed pellet size will be 12.96 mm. Thus, about 57% (from their maximum size of 15 mm) of fired pellets of the bottom and side bed, which have undergone repeated high-temperature heating and have a decrystallized iron-silicate bond of ore grains, will be included in the finished products. The technology was developed, the essence of which is that only pellets with a diameter of 1-3 mm larger than the maximum diameter of the suitable fraction of fired pellets are used as bottom and side bedding. Laboratory studies have been carried out to develop the proposed technology. From the prepared charge, raw pellets were made with a grain size that ensured the production of fired pellets of fraction 9-15 mm and the separation of bottom and side bed +15 mm from them. The degree of pellet shrinkage and their final size were taken into account for the conditions of further metallization. Experimental sintering was performed in a firing bowl with a cross-sectional diameter of 300 mm and a layer height of 400 mm. The research results showed that the specific productivity of the firing unit during heat hardening of raw pellets according to the developed technology practically does not differ from that adopted in industry, however, the impact and abrasion resistance when recovering the fired pellets obtained using the proposed technology in a suitable fraction is significantly better than the existing ones. It has been proven that improving the strength characteristics of fired pellets in the process of their recovery in a mine furnace for metallization is quite possible without costly reconstructions and significant capital investments.

Keywords: iron ore pellets, metallization, bottom and side bedding, heat hardening, strength, recovery, blast furnace.

Постановка проблеми. Виробництво залізородних окатишів для металізації (DRI-окатиші) вимагає більш жорстких підходів до якості сировини, властивостей вихідної продукції та контролю над технологічним процесом. На українських металургійних підприємствах, які опановують виробництво окатишів для металізації, основним мірилом потенційної якості продукції для подальшої металізації є вміст заліза. В той же час, спектр металургійних властивостей хоч і

є не менш важливим фактором, що впливає на якість продукції, проте методи його покращення відповідають методам, які застосовуються для звичайних окислених окатишів, що направляються в доменні печі. Таким чином, втрачається суттєвий потенціал поліпшення властивостей DRI-окатишів, якщо не впроваджувати додаткові механізми управління процесом термозміцнення.

Важливими елементами процесу термозміцнення залізорудних окатишів є донна та бортова постіль, які виготовляються з готових обпалених окатишів та становлять 30-35 % від загальної маси готової продукції. Істотним недоліком використання обпалених окатишів для постілі є їх повторне нагрівання до 900-1300°C. Це призводить до розкристалізації скляної заліzosилікатної зв'язки рудних зерен, яка забезпечує міцність окатишів при відновленні. Внаслідок цього утворюється значна кількість дріб'язку після завантаження окатишів у доменну піч [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Донна та бортова постіль є обов'язковими елементами сучасної технології термозміцнення залізорудних окатишів [2]. Як уже відмічалось раніше [1], в науковому середовищі є прогалина, яка стосується досліджень щодо оптимального розміру бортової та донної постілі, що пов'язано з підходом, при якому вона розглядається як частина процесу та нехтуються фізико-хімічні процеси, що відбуваються з постіллю.

На сьогоднішній день істотним резервом покращення процесів термозміцнення окатишів є удосконалення газодинамічних процесів, що відбуваються в шарі окатишів. Цьому напрямку присвячена велика кількість робіт, враховуючи, що за останні десятиліття суттєвих революційних змін в технології та обладнанні не відбулось [3, 4].

В дослідженні [5] на основі промислової роботи обпалювальної конвеєрної машини продуктивністю 4,2 млн тонн на рік був виконаний аналіз властивостей окатишів різного розміру (від 8 до 16 мм). Показано, що використання окатишів трохи більшого розміру для формування донної та бортової постілі покращує металургійні характеристики готової продукції.

Покращення загальної газодинамічної картини процесу за рахунок оптимізації розміру постілі відмічається і в роботі [6]. Важливість контролю та управління крупністю окатишів, в тому числі і для подальшої металізації, відмічається в цілому ряді інших робіт [7-12].

Окремої уваги заслуговує математична модель [13], яка симулює процес сушки та термозміцнення залізорудних окатишів, враховуючи пористість загального шару. В основі моделі лежать закони масо- і теплообміну, фізичних процесів і хімічних реакцій, що відбуваються під час обпалення.

В печах для металізації використовують обпалені окатиші з меншим максимальним діаметром 9-15 мм (середній діаметр дорівнює 12 мм). При застосуванні найближчої відомої технології [14], для донної постілі виділяють обпалені окатиші, середній діаметр яких перевищує в 1,08-1,75 рази середній діаметр сирих окатишів. В цьому випадку за мінімальним коефіцієнтом це буде складати 12,96 мм і в готову продукцію потрапить близько 57% (від їх максимального розміру 15 мм) обпалених окатишів донної і бортової постілі, які пройшли повторний високотемпературний нагрів, з розкристалізованою заліzosилікатною зв'язкою рудних зерен і, відповідно, з низькою міцністю при відновленні, що після завантаження окатишів в піч призведе до порушення її газодинамічного режиму і зниження техніко-економічних показників роботи: зменшення продуктивності печі і погіршення гранулометричного складу металізованих окатишів – збільшення дріб'язку із зруйнованих окатишів. За максимальним коефіцієнтом – 21 мм (перевищення на 6 мм від максимального розміру обпалених окатишів) окатиші для донної і бортової постілі в готовій продукції просто відсутні і постіль необхідно буде отримувати в окремому агрегаті, що практично нераціонально.

Мета статті – розробка технологічних рішень по недопущенню потрапляння в готову продукцію залізорудних окатишів для металізації з розкристалізованою заліzosилікатною зв'язкою рудних зерен і, відповідно, з низькою міцністю при відновленні, а також спрощення технології виділення постілі.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення даної проблеми була розроблена технологія, сутність якої полягає в тому, що в якості донної і бортової постілі використовуються тільки обпалені окатиші діаметром на 1-3 мм більше діаметру, який обмежує максимальний діаметр придатної фракції обпалених окатишів.

Для відпрацювання запропонованої технології були проведені лабораторні дослідження. З підготовленої шихти виготовляли сирі окатиші крупністю, що забезпечувало отримання з них обпалених окатишів фракції 9-15 мм і виділення з них донної і бортової постілі +15 мм. При цьому враховували, що в процесі термозміцнення при максимальній температурі обпалення до 1300°C ступінь усадки окатишів, в залежності від складу окатишів для металізації з гранично багатого концентрату і низькою основністю, становить 1-5%. Термозміцнення окатишів здійснювали в обпалювальній чаші діаметром живого перетину 300 мм і висотою 500 мм (висота донної постілі складала 100 мм, бортової постілі – 70 мм, а загальна висота шару – 400 мм).

Результати випробувань наведені в таблиці, з якої видно, що питома продуктивність обпалювального агрегату при термозміцненні сирих окатишів за розробленою технологією практично не відрізняється від прийнятої в промисловості.

Таблиця

Порівняння показників якості окатишів, отриманих за діючою та розробленою технологіями

Показники	Діюча технологія	Технологія згідно [14]	
		$k_{\min} = 1,08$	$k_{\max} = 1,75$
Питома продуктивність ОКМ, т/м ² ·год	0,96	0,96	0,91
Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	237	233	235
Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)	63,4	62,9	66,7
Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005)	9,3	9,4	8,7
Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)	88,5	88,6	86,7

Продовження таблиці

Показники	Розроблена технологія		
	+15 мм		
	15-16 мм	15-18 мм	15-20 мм
Питома продуктивність ОКМ, т/м ² ·год	0,97	0,97	0,96
Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	235	236	234
Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)	87,3	86,4	86,2
Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005)	3,4	3,7	3,8
Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)	89,4	89,1	88,2

Виняток становить лише випадок використання максимального (1,75) коефіцієнта крупності, при якому продуктивність трохи нижче. Аналогічні тенденції має і показник міцності на стиск обпалених окатишів за розробленою технологією та існуючою. А ось міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за запропонованою технологією, істотно краще, ніж за існуючими, так як вони не проходили повторного високотемпературного нагріву і мають залізоокисну зв'язку рудних зерен. В окатишах ж, обпалених за існуючими способами, в значній частині залізоокисна зв'язка розкриталізована, що тягне за собою їх більше руйнування при відновленні. Ступінь відновлення обпалених за розробленим способом окатишів незначно вище, ніж за відомими, але для процесу металізації це важливо.

В промислових умовах реалізація запропонованої технології можлива без реконструкції основного технологічного обладнання та суттєвих капіталовкладень. Єдині конструктивні зміни, які потребуються – це зміна величини отворів деяких зон існуючих грохотів. Виходячи з

виробництва максимального розміру придатної фракції обпалених окатишів 15 мм і певної експериментально визначеної величини її зменшення за рахунок усадки (зазвичай в діапазоні 1-5%), отвори сита для виділення придатного класу з сирих окатишів повинні бути більше на 0,2-0,8 мм максимального розміру обпалених окатишів. Таким чином, визначають необхідний діаметр вихідних сирих окатишів, щоб в процесі їх термозміцнення отримати максимальний діаметр обпалених окатишів на 1-3 мм більше максимального діаметра придатної фракції. Таким чином, максимальний діаметр сирих окатишів повинен бути, з урахуванням максимального діаметра придатної фракції обпалених окатишів і діапазону величини усадки, відповідно, від 16,2-18,2 до 16,8-18,8 мм. Після термозміцнення з обпалених окатишів виділяють послідовно на грохоті наступні фракції: 0-9 мм – дріб'язок у зворот; 9-15 мм – придатна фракція готової продукції; +15 мм – донна і бортова постіль.

Таким чином, розроблена технологія дозволяє істотно поліпшити характеристики міцності обпалених окатишів в процесі їх відновлення в шахтній печі для металізації, що призводить до поліпшення техніко-економічних показників роботи печі.

Висновки

1. Відмічено покращення загальної газодинамічної картини процесу за рахунок оптимізації розміру постілі. Проаналізовано найближче технологічне рішення щодо виділення донної та бортової постілі, при якому виділяють обпалені окатиші, середній діаметр яких перевищує в 1,08-1,75 рази середній діаметр сирих окатишів. Знайдений недолік цієї технології, при якому в готову продукцію потрапить близько 57% (від їх максимального розміру 15 мм) обпалених окатишів донної і бортової постілі, які пройшли повторний високотемпературний нагрів та мають розкристалізовану залізісилікатну зв'язку рудних зерен.

2. Розроблена технологія, сутність якої полягає в тому, що в якості донної і бортової постілі використовуються тільки окатиші діаметром на 1-3 мм більше максимального діаметру придатної фракції обпалених окатишів. Проведені лабораторні дослідження щодо відпрацювання запропонованої технології. Дослідні спікання виконували в обпалювальній чаші діаметром живого перетину 300 мм і висотою шару 400 мм.

3. Результати досліджень показали, що питома продуктивність обпалювального агрегату при термозміцненні сирих окатишів за розробленою технологією практично не відрізняється від прийнятої в промисловості, проте міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за запропонованою технологією, істотно краще, ніж за існуючими.

4. Доведено, що поліпшення характеристик міцності обпалених окатишів в процесі їх відновлення в шахтній печі для металізації цілком можливо без вартісних реконструкцій та суттєвих капіталовкладень.

Перелік використаних джерел:

1. Чупринов Є. В., Кассім Д. О., Реков Ю. В. Дослідження можливості підвищення якості окатишів за рахунок кращого методу підготовки донної та бортової постілі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 47-52. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310674>.
2. De Moraes S. L., De Lima J. R. B., Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. 2018. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>.
3. Ljung A.-L., Lundström T. S., Tano K. Simulation of heat transfer and fluid flow in a porous bed of iron ore pellets during up-draught drying. *Proceedings of the 5-fth International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia, 13-15 December 2006. Pp. 1-6.
4. Ljung A.-L., Lundström T. S., Tano K. Fluid flow and heat transfer within and around a porous pellet placed in infinite space. *Proceedings of the 19th International Symposium on Transport Phenomena*, Reykjavik, Island, 17-21 August 2008. Pp. 1-7.
5. Effect of Iron Ore Pellet Size on its Properties and Microstructure / T. Uma et al. *Steel research international*. 2009. Vol. 80. Iss. 10. Pp. 709-716. DOI: <https://doi.org/10.2374/SRI08SP169>.

6. Kim G., Pistorius P. C. Strength of Direct Reduced Iron Following Gas-Based Reduction and Carburization. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 51. No. 6. P. 2628-2641. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01958-x>.
7. Vision-based size classification of iron ore pellets using ensembled convolutional neural network / A. J. Deo, A. Sahoo, S. K. Behera, D. P. Das. *Neural Computing and Applications*. 2022. Vol. 34. Pp. 18629-18641. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07473-1>.
8. Satyan Patra A., Rayasam V. Pelletization of iron ore fines with parameter optimization through box-behnken design. *Material Science & Engineering International Journal*. 2018. Vol. 2(6). Pp. 287-292. DOI: <https://doi.org/10.15406/mseij.2018.02.00072>.
9. Thella J. S., Venugopal R. Modeling of iron ore pelletization using 3 ** (k-p) factorial design of experiments and polynomial surface regression methodology. *Powder Technology*. 2011. Vol. 211. No. 1. Pp. 54-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.03.027>.
10. Influence of Pellet Size on Quality and Microstructure of Iron Ore Pellets / S. Dwarapudi, T. U. Devi, S. M. Rao, M. Ranjan. *ISIJ International*. 2008. Vol. 48. No. 6. Pp. 768-776. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.768>.
11. Effect of Iron Ore Pellet Size on Metallurgical Properties / M. Iljana et al. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 2. Article 302. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12020302>.
12. Influence Of Iron Ore Pellet Size On Some Properties Of Sponge Iron In Midrex Technology / M. Javaheri et al. *Exploratory Materials Science Research*. 2023. Vol. 4. No. 2. P. 122-124. DOI: <https://doi.org/10.47204/emsr.4.2.2023.122-124>.
13. Tan S., Peng J., Shi H. Modeling and simulation of iron ore pellet drying and induration process with accurate bed void fraction calculation. *Drying Technology*. 2015. Vol. 34. No. 6. Pp. 651-664. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1070357>.
14. Способ обжига окатышей на конвейерной машине: а.с. 1010144 СССР: МПК C22B1/20. № 3332634/22-02; заявл. 23.07.81; опубл. 07.04.83, Бюл. № 13. 4 с.

References:

1. Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim, and Yu.V. Rekov, «Doslidzhennia mozhlyvosti pidvyshchennia yakosti okatyshiv za rakhunok krashchoho metodu pidhotovky donnoi ta bortovoi postili» [«Study of the possibility of improving the quality of pellets through a better method of bottom and side bed preparation»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 48, pp. 47-52, 2024. doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310674. (Ukr.)
2. S.L. de Moraes Moraes, J.R.B. de Lima, and T.R. Ribeiro, «Iron Ore Pelletizing Process: An Overview», *Iron Ores and Iron Oxide Materials*, 2018. doi: 10.5772/intechopen.73164.
3. A.-L. Ljung, T.S. Lundström, and K. Tano, «Simulation of heat transfer and fluid flow in a porous bed of iron ore pellets during up-draught drying», in Proc. of the 5th Int. Conf. on CFD in the Process Industries, Melbourne, Australia, 2006, pp. 1-6.
4. A.-L. Ljung, T.S. Lundström, and K. Tano, «Fluid flow and heat transfer within and around a porous pellet placed in infinite space», in Proc. of the 19th Int. Symposium on Transport Phenomena, Reykjavik, Island, 2008.
5. T. Uma, P. Kumar, N. Lobo, P. B. Mahapatra, M. Prabhu, and M. Ranjan, «Effect of Iron Ore Pellet Size on its Properties and Microstructure», *Steel research international*, vol. 80, iss. 10, pp. 709-716, 2009. doi: 10.2374/SRI08SP169.
6. G. Kim, and P.C. Pistorius, «Strength of Direct Reduced Iron Following Gas-Based Reduction and Carburization», *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, no. 6, pp. 2628-2641, 2020. doi: 10.1007/s11663-020-01958-x.
7. A.J. Deo, A. Sahoo, S.K. Behera, and D.P. Das, «Vision-based size classification of iron ore pellets using ensembled convolutional neural network», *Neural Computing and Applications*, vol. 34, pp. 18629-18641, 2022. doi: 10.1007/s00521-022-07473-1.
8. A. Satyan Patra, and V. Rayasam, «Pelletization of iron ore fines with parameter optimization through box-behnken design», *Material Science & Engineering International Journal*, vol. 2(6), pp. 287-292, 2018. doi: 10.15406/mseij.2018.02.00072.
9. J.S. Thella, and R. Venugopal, «Modeling of iron ore pelletization using 3 ** (k-p) factorial design

- of experiments and polynomial surface regression methodology», *Powder Technology*, vol. 211, no. 1, pp. 54-59, 2011. doi: 10.1016/j.powtec.2011.03.027.
10. S. Dwarapudi, T. U. Devi, S. M. Rao, and M. Ranjan, «Influence of Pellet Size on Quality and Microstructure of Iron Ore Pellets», *ISIJ International*, vol. 48, no. 6, pp. 768-776, 2008. doi: 10.2355/isijinternational.48.768.
11. M. Iljana, T. Paananen, O. Mattila, M. Kondrakov, and T. Fabritius, «Effect of Iron Ore Pellet Size on Metallurgical Properties», *Metals*, vol. 12, no. 2, article 302, 2022. doi: 10.3390/met12020302.
12. M. Javaheri, A. Yarahmadi, H. Salari, M. Salari, E. Musaeipoor, and B. Azartoos, «Influence Of Iron Ore Pellet Size On Some Properties Of Sponge Iron In Midrex Technology», *Exploratory Materials Science Research*, vol. 4, no. 2, pp. 122-124, 2023. doi: 10.47204/emsr.4.2.2023.122-124.
13. S. Tan, J. Peng, H. Shi, «Modeling and simulation of iron ore pellet drying and induration process with accurate bed void fraction calculation», *Drying Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 651-664, 2015. doi: 10.1080/07373937.2015.1070357.
14. F.A. Riabokon, «Sposob obzhyha okatyshnei na konveiernoi mashyne» [«Method of firing pellets on a conveyor machine [Sposob obzhiga okatishei na konveiernoi mashine]», *USSR certificate of authorship 1010144*, Apr. 7, 1983. (Rus.)

Стаття надійшла 07.08.2024

Стаття прийнята 28.08.2024

УДК 669.182.71

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321241

© Бакланський В.М.¹, Каргін С.Б.², Хвостов Д.В.³

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ІЗ ЗАМІНОЮ ЧАСТИНИ ВАПНА КІНЦЕВИМ КОНВЕРТЕРНИМ ШЛАКОМ І ВАПНЯКОМ

Об'єктом дослідження є технологія ведення конвертерної плавки із заміною частини вапна вапняком і кінцевим конвертерним шлаком. Ціль роботи: визначення технологічної можливості ведення конвертерної плавки із заміною частини вапна вапняком і кінцевим конвертерним шлаком. У результаті проведеної роботи виконані літературний аналіз питання заміни вапна в киснево-конвертерному процесі іншими шлакоутворюючими матеріалами, лабораторні дослідження з визначенням розчинності вапна в конвертерному шлаку з різною кількістю недопалу від 2,20 до 38,10%. Доведено, що оксид вуглецю, що виділяється, при дисоціації вапняку, руйнуючи скоринку, сприяє розчиненню вапна. При використанні матеріалів, що містять СаО, кращі властивості, що рафінують, мали шлаки плавки при застосуванні чистого слабо обожненого доломіту в кількості більш 3 т на плавку. Присадки доломіту забезпечували зниження витрати плавикового шпату на 0,7 кг/т сталі й досить високий ступінь обезсірювання (38,3%), разом з тим вміст фосфору був трохи вище, чим на звичайних плавках, хоча й не перевищувало меж ДСТ. Експериментально встановлено, що застосування вапна з різним ступенем випалу, заміна частини вапна вапняком, а також заміна частини вапна вапняком і кінцевим конвертерним шлаком не вносить особливих змін у ведення технології конвертерної плавки. Розроблені рекомендації в ТІ 232-143-96 за технологією конвертерної плавки з використанням вапняку й кінцевого конвертерного шлаку.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0000-4437-562X, Baklanskiy_v_m@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8102-4578, kargin_s_b@pstu.edu

³ перший заступник генерального директора, ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», м. Дніпро

Ключові слова: конвертер, вапно, вапняк, агломерат, флюс, технологічний шлак, основність, сляб, якість.

V.M. Baklanskiy, S.B. Kargin, D.V. Khvostov. Development of converter smelting technology with replacement of part of lime with final converter slag and limestone. The object of research is the technology of converter smelting with the replacement of a part of lime with limestone and the final converter slag. The purpose of the work: to determine the technological possibility of conducting a converter smelter with the replacement of part of the lime with limestone and the final converter slag. As a result of the work carried out, a literature analysis of the issue of replacing lime in the oxygen-converter process with other slag-forming materials, laboratory studies with the determination of the solubility of lime in converter slag with different amounts of underfired from 2,20 to 38,10% were performed. It has been proven that the carbon monoxide released during the dissociation of limestone, destroying the crust, contributes to the dissolution of lime. When using materials containing CaO, smelter slags had the best refining properties when using pure weakly deionized dolomite in the amount of more than 3 tons per smelter. Additives of dolomite ensured a decrease in the consumption of fluorspar by 0,7 kg/t of steel and a fairly high degree of desulfurization (38,3%), at the same time, the phosphorus content was slightly higher than in conventional melts, although it did not exceed the DST limits. It has been experimentally established that the use of lime with different degrees of firing, the replacement of part of lime with limestone, as well as the replacement of part of lime with limestone and the final converter slag does not make any significant changes in the operation of converter smelting technology. Recommendations were developed in TI 232-143-96 on converter smelting technology using limestone and final converter slag.

Keywords: converter, lime, limestone, agglomerate, flux, technological slag, basicity, slab, quality.

Постановка проблеми. Технологія конвертерної плавки, а саме процес шлакоутворення, протікає задовільно тільки в тому випадку, якщо під час продувки використовується необхідна кількість вапна. Вапно одержують в обортових або в шахтних вапняно-випалювальних печах, що працюють на природному газі. У випадку зниження поставки природного газу виробництво і якість вапна знижуються, що приводить до скорочення виробництва сталі. З цим фактом конвертерні цеха зустрічаються вже не один рік, і особливо актуально це питання піднімається в зимовий період часу.

У світовій і вітчизняній практиці відомі технології з часткової або з повної заміни вапна вапняком. Можливі домішки щебіркою, доломітованим вапном, агломератом різної основності, різними синтетичними флюсами, частково (тобто половиною) або ж повністю залишеним від попередньої плавки технологічним шлаком.

Для безперебійної роботи конвертерного цеху пропонується технологія, що включає використання вапняку, у тому числі обпаленого шлаку попередньої плавки, застосування частини кінцевого шлаку і проміжне скачування шлаку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У якості шлакоутворюючих матеріалів замість звичайного вапна можна застосовувати вапняк і агломерат. Однак добавка вапняку супроводжується хімічними реакціями, що поглинають тепло. Авторами роботи [1] у киснево-конвертерному цеху вивчена можливість поліпшення показників конвертерної плавки шляхом застосування високоосновного агломерату металургійного заводу. Основність агломерату 3,15 (до 25,0% CaO) і 2,5 (до 15,0% CaO) [2]. Присадка агломерату виключила введення охолоджувача (руди) і значної частини флюсу.

Заміна руди й частини вапна високоосновним агломератом збільшує вихід придатного на 0,5-2,1%, що дозволяє скоротити загальну витрату оксиду кальцію на ~50 % без шкоди для основності шлаків і ступеня десульфурації й дефосфорації металу.

Дослідження показали, що збільшення основності й вмісту окису кальцію у високоосновному агломераті є бажаним заходом підвищення ефективності його впливу на показники конвертерного процесу. Згідно з результатами проведених досліджень [2], вапно може бути повністю

замінено вапняком, але це сповільнює процес шлакоутворення, збільшує тривалість продувки, викликає не завжди бажане спінювання шлаків. Позитивною стороною заміни вапна вапняком є додаткове перемішування металевої ванни при виділенні діоксиду вуглецю – вапнякове кипіння.

Сильна охолодна дія вапняку (в 1,15 рази більше, ніж руди) змушує зменшити присадку руди або лома, у результаті цього трохи знижується вихід металу. Недоліком охолодження ванни вапняком є викиди під час бурхливого розкладання вапняку.

Звичайно, дрібно-дробленим вапняком замінюють частину вапна, що не перевищує 25%. Застосування вапняково-рудних брикетів [3, 4] прискорює шлакоутворення при більш швидкому і повному засвоєнні оксидів кальцію шлаками, збільшує рідку рухомість шлаків і підвищує вихід придатного на 0,5-1,3 рази. Состав брикетів, %: 24,5-27,2 Fe_{заг.}; 2,6-3,3 SiO₂; 21,5-35,5 CaO. Брикети присаджують після заливання чавуну в конвертор.

На деяких заводах США й СНД частину вапна замінюють щебіркою доломітзованого вапна [1]. Результати його застосування свідчать про прискорення шлакоутворення внаслідок більш низької температури його плавлення. Застосування даного матеріалу аналогічне результатам, отриманим під час роботи з м'яким високоактивним вапном з високим вмістом CaO й Fe₂O₃.

Витрата вапняку й вапна на плавку залежить від кількості рідкого чавуну в конвертері, вмісту кремнію в чавуні й його температури, з якої він заливається в конвертер [5].

При нагріванні вапняку відбувається ендотермічна реакція $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ – 42500 ккал/моль з утвором CaO й CO₂. Нормальний вміст у вапняку CaO більш 54%, домішки, особливо SiO₂, небажані. Припустима межа вмісту фосфору – 0,03%. Для одержання шлаків з найкращою основністю рекомендується використовувати вапняк з вмістом CaO близько 55%. Однак, оскільки під час продувки відразу ж відбувається реакція утвору CaO, то у первісний період продувки теча шлакоутворення трохи запізнюється. Разом з тим при розкладанні вапняку поглинається велика кількість тепла і інтенсивність охолодження рідкої сталі вище. Крім цього, вапняк дешевше вапна. Ураховуючи ці особливості, бажано використовувати вапняк у наступних випадках:

а) при високій витраті рідкого чавуну гарний ефект дає завантаження його в початковий період, більш зручний з теплової точки зору;

б) для регулювання охолодження, шлакоутворення й запобігання викидам у процесі плавки необхідно завантажувати вапняк порціями по 100 кг;

в) для використання вапняку в ЛД-конвертері з метою поліпшення реактивної здатності шлаку вапняк звичайно подрібнюють до 10-30 мм.

Ураховуючи дешевину вапняку і його властивості, бажане, по можливості, застосовувати вапняк замість вапна.

У якості комбінованого флюсу, з метою поліпшення шлакоутворення, застосовують обпалені ферити кальцію [5]. Наприклад, до конвертерного пилу додають 40-95% вапна, формують брикети величиною приблизно 40 мм і обпалюють при температурі 1100-1200°C в звичайних випалювальних печах. Крапка плавлення цього фериту кальцію близько 1400°C. Застосовують його в первісний період плавки. Обпалений ферит кальцію поліпшує шлакоутворювальну здатність вапна, підвищує дефосфоруєчу здатність шлаків.

В інших випадках до вапняку з крупністю шматків 5-20 мм додають 2% пилу, що містить оксиди заліза (конвертерний пил) і 2% води, змішують і обпалюють в обертовій випалювальній печі при 1300°C. На поверхні обпаленого вапна частково утворюється ферит кальцію. Застосування даного флюсу також прискорює засвоєння вапна, підвищує дефосфоруєчу й десульфуєчу здатність шлаків.

Особливості шлакоутворення в кисневому конвертері при застосуванні високоосновного агломерату розглянуті в роботі [6]. Авторами показане, що високоосновний агломерат має низьку температуру плавлення (не більш 1300°C) і містить CaO, в основному, у вигляді феритів. Прискорення, що спостерігається, формування шлаків на всіх етапах продувки при використанні високоосновного агломерату дозволяє одержати більш високі значення коефіцієнту розподілу сірки (L_s) або низький вміст сірки в металі.

Прискорене формування шлаків у плавках з високоосновним агломератом визначається як швидким розчиненням вапна в шлаках плавки, що вводиться в різних періодах у ванну разом з агломератом, так і утвором з перших хвилин продувки основних шлаків зі зниженою

концентрацією й активністю кремнезему. Це прискорює зовнішній масоперенос у початковий період плавки в результаті зниження в'язкості й ускладнює в цей період утворіння на шматках вапна труднорозчинених оболонок ортосилікату кальцію.

На Єнакіївському металургійному заводі авторами роботи [7] проведені промислові дослідження по спіканню агломерату високої основності (до 5-7) і досліди процесу шлакоутворення в кисневих конвертерах садкою 130-т. Найкращі результати по прискоренню процесу шлакоутворення були отримані при роботі з агломератом основністю 5. Застосування окатишів також ефективно.

Мета статті – проведення промислових досліджень з метою визначення можливості використання у киснево-конвертерному процесі замість вапна (або частини його) вапняку, попередньо обпаленого в конвертері кінцевого конвертерного шлаку, разом з частиною кінцевого конвертерного шлаку.

Виклад основного матеріалу. Був проведений ряд серій плавок у киснево-конвертерному цеху при різних варіантах технологічного процесу.

Варіанти з заміною частини вапна вапняком з витратою його від 3,5 до 10 т і витратою вапна від 25 до 30 т, з відповідним зниженням його витрати в міру збільшення витрати вапняку. Результати основних технологічних показників здійснених плавок наведено в таблиці 1, 2 та 3.

Таблиця 1

Значення технологічних параметрів порівняльних плавок,
проведених з витратою вапняку в завалку від 1,0 до 3,0 тон

№ п/п	Номер плавки	Марка сталі	Q _m , CaO, т	Q, CaCO ₃ , т	Основність кінце- вого шлаку, В	Витрата, т	
						чавун	лом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1600090	09Г2С	25	1,5	3,1	300	60
2	1600685	Г7Г1СУ	30	3,0	3,1	295	80
3	1601244	ЗГсп	27	1,0	3,3	290	70
4	1601266	Д32	25	1,0	3,3	295	70
5	2601487	А36	26	3,0	3,3	295	85
6	1601982	ІЗГІСУ	21	1,0	3,5	295	75
7	1601984	А36	23	1,0	3,3	295	75
8	1602033	St 52,3	27	1,0	3,1	295	78
9	1602712	SS 400	27	1,0	3,2	300	70

Продовження таблиці 1

№ п/п	Вихід рід- кого, т	Час проду- вання, хв	Концентрація сірки, %			Коефіцієнт розподілу сірки, L _s	Вміст (FeO) %	Темпе- ратура поверх- ні, t °C	Вміст у чавуні, [Si] %
			чавун	опісля продувці	готовий сталі				
1	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	351,4	16	0,015	0,013	0,010	13,33	17	1680	1,25
2	335,2	14	0,016	0,015	0,013	6,25	12	1670	0,83
3	340,1	14'20"	0,019	0,018	0,015	5,26	13	1705	0,79
4	334,3	14	0,019	0,017	0,013	10,53	11	1675	0,81
5	341,9	15	0,013	0,012	0,011	7,69	12	1655	0,85
6	322,3	14'15"	0,018	0,014	0,012	22,22	13	1685	0,76
7	295,5	14	0,013	0,011	0,008	15,39	12	1720	1,19
8	327,4	13'50"	0,015	0,012	0,007	20,00	12	1650	0,73
9	334,3	14'39"	0,0149	0,0139	0,0112	6,71	12,45	1675	0,96

Аналіз технологічних показників дослідних плавов, що наведені у таблиці 3, показує, що такі основні показники, як витрата рідкого чавуну й лома, час продувки, температура металу наприкінці продувки та вміст заліза в шлаках, практично не відрізняються від показників серії порівняльних плавов.

Таблиця 2

Значення технологічних параметрів порівняльних плавов,
проведених з витратою вапняку в завалку від 3 до 10 тон

№ п/п	Номер плавки	Марка сталі	Витрата, т			Основність кінцевого шлаку, В	Витрата, т	
			CaO	CaCO ₃	ΣCaO		чавун	лом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1603655	A36	25	3,5	26,7	3,1	300	60
2	1604257	13Г1СУ	25	4,0	27,0	3,1	285	75
3	1604301	3Гсп	24	6,0	27,0	3,4	300	60
4	1604469	SS400	24	6,0	27,0	3,2	290	60
5	1603654	A36	23	8,0	27,0	3,1	300	60
6	2604024	Д32	22	9,0	26,5	3,0	285	80
7	1604857	3сп	22	9,0	26,5	3,0	295	70
8	1603569	A516-70	21	10	26	3,2	290	70
9	1603674	E32	21	10	26	3,4	290	70
10	1603675	E32	21	10	26	3,2	290	70
11	1603678	SS400	21	10	26	3,3	290	70

Продовження таблиці 2

№ п/п	Вихід рідкого, т	Час продування, хв	Концентрація сірки, %			Коефіцієнт розподілу сірки, L _S	Вміст (FeO) %	Температура поверхні, t °C	Вміст у чавуні, [Si] %
			чавун	після продування	готова сталь				
1	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	338,6	15	0,033	0,016	0,010	51,5	13	1675	0,92
2	316,3	14	0,019	0,019	0,003	0,9	14	1670	0,92
3	295,1	19	0,020	0,014	0,007	30,00	17	1675	0,79
4	282,0	18	0,016	0,013	0,010	18,75	14	1680	0,77
5	317,30	14'56"	0,017	0,013	0,010	28,24	14	1678	0,787
6	310,8	14	0,016	0,013	0,010	18,75	14	1680	0,63
7	320,0	12	0,015	0,009	0,006	66,67	10	1660	1,34
8	322,64	14'61"	0,0224	0,0161	0,010	28,13	13,61	1674	0,71
9	308,7	15	0,018	0,010	0,006	44,44	10	1665	0,90
10	313,9	16	0,030	0,027	0,014	10,00	16	1675	0,71
11	329,2	15	0,029	0,018	0,016	37,93	17	1675	0,76

Спостережувані деякі коливання основності шлаків від плавки до плавки пояснюються як коливаннями витрати чавуну від плавки до плавки, так і коливаннями в ньому вмісту кремнію. Однак цей показник у всіх серіях плавов практично не відрізняється від показника основності порівняльних плавов. Такий показник як ступінь десульфурації також коливається від плавки до плавки на порівняльних (від 0 до 14,44% й від 0 до 66,67% на дослідних плавках), в основному, визначаючись вихідним вмістом сірки в чавуні й вимогами ТІ 232-143-96 по вмісту її в готовому металі. Однак загальним для всіх серій проведених дослідних плавов є позитивний ступінь десульфурації металу.

З метою визначення можливості застосування в кисневих конвертерах замість вапна (частини її) вапняка разом із частиною залишеного від попередньої плавки технологічного шлаку було проведено три серії плавов по трьом варіантам, результати технологічних показників яких

представлено в таблиці 3.

Варіант І. Плавки проведені з витратою на плавку: вапна 20 т, вапняку 10-11 т і залишенням близько 10-15 т технологічного шлаку від попередньої плавки, який згущали вище зазначеною кількістю вапняку за методикою, викладеної в рекомендаціях. По даному варіанту проведено 6 плавок.

Варіант ІІ. Плавки проводилися з витратою на плавку: вапна 18-19 т, вапняку 12 т і залишенням ~50 % шлаку (~20-30 т) з згущенням його вапняком. По даному варіанту проведено 3 плавки.

Варіант ІІІ. Плавки проводилися з витратою на плавку: 12 т вапна, 12 т вапняку й залишенням 100 % шлаку і згущенням його вапняком. По даному варіанту проведено 3 плавки.

Таблиця 3

Значення технологічних параметрів дослідних плавок, проведених з витратою вапняку в завалку від 10 до 12 тон із залишенням кінцевого шлаку попередньої плавки

№ п/п	Марка сталі	Витрата, т			Основність кінцевого шлаку, В	Витрата, т	
		CaO	CaCO ₃	ΣCaO		чавун	лом
1	2	4	5	6	7	8	9
Варіант 1. Залишено кінцевого шлаку від попередньої плавки 20%							
1	Зсп	20	10	25,0	3,1	300	70
3	А суд	20	10	25,0	3,1	285	80
4	А36	20	10	25,0	2,8	345	60
5	АН-32	20	11	25,0	3,0	300	60
6	В суд	20	11	25,0	3,2	290	68
Варіант 2. Залишено кінцевого шлаку від попередньої плавки 50%							
1	Зсп	18	12	24,0	3,2	295	65
2	АН-32	19	12	25,0	3,2	295	60
3	SS400	18	12	24,0	3,1	285	70
Варіант 3. Залишено кінцевого шлаку від плавки 100%							
1	SS400	12	12	18,0	3,1	285	80
2	SS400	12	12	18,0	3,1	250	50
3	А36	15	12	21,0	3,1	270	75

Продовження таблиці 3

Вихід рідкого, т	Час продування, хв	Концентрація сірки, %			Коефіцієнт розподілу сірки, L_s	Вміст (FeO) %	Температура поверхні, t °C	Вміст у чавуні, [Si] %
		чавун	після продування	готова сталь				
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Варіант 1 Залишено шлаку від попередньої плавки 20%								
315,1	15	0,016	0,016	0,014	0	11	1665	0,96
278,2	14	0,022	0,015	0,013	0	14	1665	1,00
327,8	13'30"	0,013	0,020	0,016	31,82	14	1695	0,60
306,1	14	0,021	0,011	0,011	35,00	14	1675	0,97
331,4	13'20"	0,017	0,017	0,014	47,62	16	1675	0,51
307,7	14'60"	0,018	0,0154	0,0126	0	14	1680	1,05
Варіант 2 Залишено шлаку від попередньої плавки 50%								
326,4	16	0,016	0,020	0,016	25,00	11	1670	0,65
320,6	13'30"	0,009	0,011	0,009	22,22	18	1660	0,62
315,6	13'35"	0,0125	0,011	0,0095	30,00	13	1705	1,10
Варіант 3 Залишено шлаку від плавки 100%								
292,6	15	0,007	0,007	0,011	0	14	1675	1,05
282,4	14	0,007	0,013	0,010	85,71	11	1695	1,16
334,4	13'20"	0,011	0,009	0,010	18,18	15	1690	0,83

Аналіз технологічних показників, проведених по трьом варіантам плавки, показує, що жоден із трьох варіантів не вніс змін у витрату чавуну й лома, не відбився на основності й окиснюваності шлаку, не вплинув на температуру металу на випуску. Ступінь десульфурації металу при проведенні плавки по всіх трьом варіантам залишалася позитивною (див. табл. 3.).

Очевидно, що тепло, витрачене на дисоціацію вапняку, було компенсовано фізичним теплом шлаку, залишеного від попередньої плавки, й тому не відбилося суттєво на веденні плавки. Однак при веденні конвертерного процесу із заміною частини вапна вапняком, враховуючи охолодну дію вапняку в співвідношенні з ломом 2:1, необхідно знижувати витрату лома на 2 тонни на кожну тонну присаджуючого вапняку, збільшуючи, відповідно, на таку ж величину масу чавуну на плавку.

Однак ведення плавки із залишенням частини або всього кінцевого конвертерного шлаку пов'язане з деякими труднощами.

Це полягає в тому, що його кількість, склад, температура й в'язкість не залишаються постійними, що може негативно позначитися на ході продувки й тривалості процесу.

Забезпечення зважування конвертерного шлаку, стабілізація шлакового й теплового режимів можуть привести до висновку, що використання рідкого кінцевого шлаку стане одним з найбільш ефективних засобів для поліпшення шлакоутворення, зниження видаткових показників вапна й плавикового шпату при переробці як звичайних, так і низькомарганцевистих чавунів.

Висновки й рекомендації:

На підстав виконаних літературних, лабораторних і промислових досліджень зроблені висновки:

- показані умови й можливість застосування як у світовий, так і у вітчизняній практиці замість вапна різних шлакоутворювальних матеріалів, таких як вапняк, щебінка, доломітозоване вапно, агломерату різної основності, різних синтетичних флюсів, половини або повністю залишеного від попередньої плавки технологічного шлаку, а також у комбінаціях залишеного шлаку (частково або повністю) разом з іншими матеріалами (вапняк, флюси і тому подібне). Відзначаються особливості технології ведення плавки при заміні частини вапна вапняком. Розглядається ефективність застосування тих або інших матеріалів, що флюсують, для умов конвертерного цеху;

- визначено, що незважаючи на те, що роль недопалу (CaCO_3) у вапні з однієї сторони зводиться до зниження температури через дисоціацію $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, а з іншої сторони до інтенсифікації розчинення вапна в шлаках за рахунок кипіння, все-таки залежно від розмірів шматка (10-50 мм для нашого випадку) і температури шлаків (1300-1650°C), час розкладання становить від 10 секунд до 1,5 хвилин, тобто тривалість його порівняна із тривалістю розчинення вапна в шлаку;

- показано, що технологія застосування в конвертерному процесі вапна з різною кількістю недопалу (з відхиленням питомих втрат при прожарюванні від вимог ТІ 232-143-96 у бік її збільшення) є цілком придатною при виплавці сталей з вмістом сірки в готовому металі 0,015-0,020% із застосуванням десульфурованого чавуну з вмістом сірки до 0,020%;

- показано, що застосування замість частини вапна вапняка від 1 до 3 т на плавку, попередньо обпаленого кінцевим конвертерним шлаком від попередньої плавки, не вносить особливих змін у ведення технології конвертерної плавки;

- показано також, що використання в киснево-конвертерному процесі замість вапна (або його частини) вапняку (з витратою від 3,5 до 12,0 т), обпаленого кінцевим конвертерним шлаком, при витраті вапна (від 25 до 13 т) та частковому, половинному або повному використанні кінцевого конвертерного шлаку попередньої плавки не суттєво впливає на хід конвертерної плавки. Однак має місце зниження ступеня десульфурації в міру збільшення витрати вапняку й кількості конвертерного шлаку;

- розроблені рекомендації для технологічних інструкцій з ведення конвертерної плавки з використанням вапняку;

- розроблена технологія рекомендується до впровадження.

Перелік використаних джерел:

1. Явойский А. В., Харлашин П. С., Чаудри Т. М. Научные основы современных сталеплавильных процессов. Мариуполь : ПГТУ, 2003. 276 с.
2. Харлашин П. С., Меджибожский М. Я. Теоретические основы сталеплавильных процессов: Учебник. Київ : ВИПОЛ, 1998. 305 с.
3. Самойленко Н. М., Аверченко В. І., Байрачний В. Б. Системи технологій та промислова екологія. Ч. І. Металургійний та енергетичний комплекс: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», Лідер, 2020. 212 с.
4. Внепечная обработка стали в ККЦ ОАО «ММК им. Ильича» / В. С. Бойко, В. В. Климанчук, Э. Н. Шебаниц, Б. В. Небога. Мариуполь: Рената, 2005. 164 с.
5. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. 454 с.
6. Umadevi T., Sah R., Mahapatra P. C. Influence of sinter basicity (CaO/SiO₂) on low and high alumina iron ore sinter quality. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions section C*. 2014. № 123 (2). Pp. 75-85. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743285514Y.0000000052>.
7. Mežibrický R., Fröhlichová M. Silico-ferrite of Calcium and Aluminum Characterization by Crystal Morphology in Iron Ore Sinter Microstructure. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56. Iss. 6. Pp. 1111–1113. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-044>.

References:

1. A.V. Iavoiskyi, P.S. Kharlashyn, and T.M. Chaudry, *Nauchnie osnovi sovremennikh staleplavilnykh protsessov* [Scientific basis of modern steelmaking processes]. Mariupol, Ukraine: PHTU Publ., 2003. (Rus.)
2. P.S. Kharlashyn, and M.Ya. Medzhybozhskiy, *Teoretycheskiye osnovi staleplavilnykh protsessov: Uchebnyk* [Theoretical Foundations of Steelmaking Processes: Textbook]. Kyiv, Ukraine: VYPOL Publ., 1998. (Rus.)
3. N.M. Samoilenko, V.I. Averchenko, and V.B. Bairachnyi, «Metallurhiinyi ta enerhetychnyi kompleks: navch. posib.» [«Metallurgical and energy complex: a textbook»], in *Systemy tekhnolohii ta promyslova ekolohiia* [Technology Systems and Industrial Ecology], vol. I. Kharkiv, Ukraine: NTU «KhPI», Lider Publ., 2020. (Ukr.)
4. V.S. Boiko, V.V. Klymanchuk, E.N. Shebanyts, and B.V. Neboha, *Vnepechnaia obrabotka staly v KKTs OAO «MМК im. Ylycha»* [Out-of-furnace steel treatment at the Ilyich Iron and Steel Works OJSC]. Mariupol, Ukraine: Renata Publ., 2005. (Rus.)
5. B.M. Boichenko, V.B. Okhotskyi, and P.S. Kharlashyn, *Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriia, tekhnolohiia, yakist stali, konstruktzii ahrehativ, retsyrkuliatsiia materialiv i ekolohiia: Pidruchnyk* [Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit designs, material recycling and ecology: Textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: RVA «Dnipro-VAL» Publ., 2006. (Ukr.)
6. T. Umadevi, R. Sah, and P.C. Mahapatra, Influence of sinter basicity (CaO/SiO₂) on low and high alumina iron ore sinter quality, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions section C*, № 123 (2), pp. 75-85, 2014. doi: 1743285514Y.0000000052.
7. R. Mežibrický, and M. Fröhlichová, Silico-ferrite of Calcium and Aluminum Characterization by Crystal Morphology in Iron Ore Sinter Microstructure, *ISIJ International*, vol. 56, № 6, pp. 1111–1113, 2016. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-044.

Стаття надійшла 13.02.2024

Стаття прийнята 02.04.2024

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ УМОВ ПЕРЕБІГУ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ЗАЛІЗА ГАЗОМ СО ПРИ ВІДНОВЛЕННІ З ВЮСТИТУ

У статті наведено результати термодинамічної оцінки можливості перебігу хімічних реакцій непрямого відновлення із вюститу заліза та його навуглецювання за допомогою відновлювального газу СО. Метою роботи є отримання виразів для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса в залежності від температури для зазначених хімічних реакцій та знаходження за їх допомогою числових значень граничних (рівноважних) температур, що дозволять визначити діапазон числових значень температур, в якому перебіг хімічних реакцій процесу навуглецювання відновленого заліза монооксидом вуглецю термодинамічно можливий. Результати проведеного термодинамічного аналізу з використанням виведених автором виразів для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса для хімічних реакцій непрямого відновлення заліза з вюститу та навуглецювання заліза газом СО дозволили встановити, що процес навуглецювання заліза термодинамічно можливий за хімічною реакцією навуглецювання заліза при непрямому відновленні його з вюститу газом СО, що складається з 2-х окремих стадій, які описуються хімічними реакціями непрямого відновлення заліза з вюститу і навуглецювання відновленого заліза газом СО, тільки при числових значеннях температур до 662°C або в діапазоні негативних значень температур. Враховуючи той факт, що хімічна реакція Белла–Будуара теоретично може перебігати при температурах, які вищі за 557°C або вищі за 697°C, або вищі за 699°C, або вищі за 706°C, або вищі за 748°C, або вищі за 750°C (згідно з літературними даними), або вищі за 709°C (за даними автора), а також великі числові значення температур робочого простору металургійних відновлювальних печей, можна зробити висновок, що навуглецювання відновленого заліза за допомогою газу СО (поряд з неможливістю відновлення заліза з вюститу газом СО понад 765°C, що було встановлено автором роботи раніше) практично не відбувається або ступінь навуглецювання заліза мізерно мала, що добре кореспондується з даними деяких літературних джерел. Зроблено висновок про навуглецювання відновленого заліза за рахунок твердого вуглецю.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, монооксид вуглецю, відновлення, навуглецювання, хімічна реакція, вюстит, вільна енергія Гіббса, ентальпія, ентропія, гранична температура.

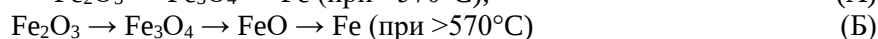
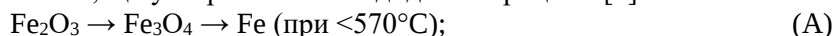
S.P. Panteikov. Thermodynamic analysis of chemical reactions conditions of iron carbonization by CO gas during reduction from wustite. The article presents the results of a thermodynamic assessment of the possibility of chemical reactions of indirect reduction of iron from wustite and its carburization using the reducing gas CO. The purpose of this work is to obtain expressions for calculating the numerical values of the Gibbs free energy depending on the temperature for the specified chemical reactions and finding with their help the numerical values of the boundary (equilibrium) temperatures, allowing us to determine the range of numerical values of temperatures in which the chemical reactions of the process of carburization of reduced iron with carbon monoxide are thermodynamically possible. The results of the thermodynamic analysis performed using the expressions derived by the author for calculating the numerical values of the Gibbs free energy for chemical reactions of indirect reduction of iron from wustite and carburization of iron by

* канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-0385-7603, ser_pant_in@ukr.net

CO gas made it possible to establish that the process of carburization of iron is thermodynamically possible by the chemical reaction of carburization of iron during its indirect reduction from wustite by CO gas, consisting of two separate stages described by chemical reactions of indirect reduction of iron from wustite and carburization of reduced iron by CO gas, only at numerical values of temperatures up to 662°C or in the range of negative temperature values. Taking into account the fact that the Bell-Boudoir chemical reaction can theoretically proceed at temperatures above 557°C or above 697°C, or above 699°C, or above 706°C, or above 748°C, or above 750°C (according to literature data), or above 709°C (according to the author), as well as high numerical values of temperatures of the working space of metallurgical reduction furnaces, it can be concluded that carburization of reduced iron by CO gas (along with the impossibility of reducing iron from wustite by CO gas above 765°C, which was established by the author of the work earlier) practically does not occur or the degree of carburization of iron is very small, which corresponds well with the data of some literary sources. A conclusion is made about the carburization of reduced iron due to solid carbon.

Keywords: thermodynamic analysis, carbon monoxide, reduction, carburization, chemical reaction, wustite, Gibbs free energy, enthalpy, entropy, boundary temperature.

Постановка проблеми. Відновлення заліза з його оксидів, що містяться в різних залізородних матеріалах, відбувається ступінчасто – за рахунок послідовних етапів відщеплення кисню від оксидів заліза – початкового і тих, що утворюються в ході даних процесів [1]:



Металургійні процеси відбуваються за високих температур, тобто відновлення заліза з його оксидів відбувається за високотемпературною схемою (Б).

Відновлене залізо завжди науглецюється до стану чавуну, при цьому вважається, що процес науглецювання відбувається за рахунок хімічних реакцій взаємодії заліза як із відновлювальним газом CO [2], так і з твердим вуглецем коксу (або вугілля) [3, 4] (зазначені процеси належать до складних гетерогенних фізико-хімічних процесів, в яких беруть участь тверді, рідкі та газоподібні речовини). Ці наукові положення також викладаються для студентів та аспірантів для їх навчання у різних літературних джерелах і на Інтернет-ресурсах.

Неминучість науглецювання відновленого заліза як в доменній печі, так і в інших відновних агрегатах, виключає можливість отримання кінцевого продукту у вигляді чистого або низьковуглецевого заліза (сталі). У зв'язку з цим актуальності набувають питання термодинамічного аналізу процесів науглецювання заліза при його відновленні з вюститу, насамперед, за рахунок газу CO.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання відновленого заліза газом CO становить значний інтерес для правильного розуміння цього процесу, а також теоретичного обґрунтування новітніх технологій отримання в одному агрегаті безпосередньо із залізовмісної сировини рідкого заліза – чавуну (або його гранульованого аналога) або сталі (що в сучасних відновних печах не вдавалося здійснити до сьогоднішнього дня, тобто виключивши проміжну стадію отримання чавуну, як це здійснювалося у давнину в різних конструкціях сиродутних горнів).

У джерелі [5] викладено умови відновлення заліза з вюститу та науглецювання відновленого заліза газом CO, які, як зазначено, відповідають двом хімічним реакціям, що відбуваються одночасно:



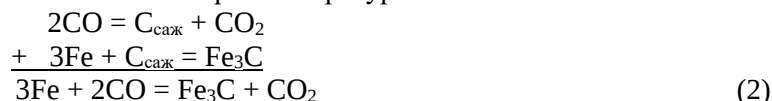
при цьому їх підсумковою реакцією буде реакція (3) непрямого відновлення із вюститу заліза з його науглецюванням до стану чавуну (карбіду заліза Fe_3C) газом CO:



Згідно із джерелом [6], науглецювання заліза теоретично може здійснюватися за двома хімічними реакціями (2) і (3), причому ступінь науглецювання заліза залежить від складу газової фази, температури нагрівання металу та тривалості витримки. При цьому вважається, що

реакція (1) відбувається при низькій температурі та за наявності у відхідному пічному газі високої концентрації оксиду вуглецю (CO). Однак при низькій температурі в шарі шихти концентрація газу CO дуже незначна, через що перебіг цієї реакції в зоні відновлення практично неможливий. На цій підставі вважається, що практично науглецювання у зазначеній зоні відбувається лише за реакцією (2). У даному випадку ступінь науглецювання заліза визначатиметься зазначеними вище факторами, причому максимальний вміст оксиду вуглецю (CO) може забезпечити науглецювання заліза лише в межах 0,10-0,20% С. Однак, як відомо, вміст вуглецю в придатній криці зазвичай становить 1,0-1,5%. На підставі цього вважається, що науглецювання заліза має відбуватися у наступних зонах, переважно, у перехідній зоні (вірогідно маєтись на увазі зона переходу заплечиків у розпар, в якому відбувається розплавлення шихти і пряме відновлення заліза із вюститу – прим. автора).

У джерелах [7, 8] зазначається, що насичення вуглецем заліза при взаємодії останнього з газом CO відбувається (після відновлення заліза з вюститу) у другій стадії процесу науглецювання (стадії вказані нижче у вигляді окремих хімічних реакцій, з яких виводиться підсумкова реакція (2)) за рахунок дифузії утвореного з газу CO в першій стадії процесу сажистого вуглецю $C_{\text{саж}}$ до маси металевого заліза при температурах 950-1150°C за схемою:



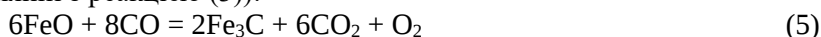
Таким чином підсумковою хімічною реакцією науглецювання заліза знову зазначається реакція (2)

У роботах [9-13] також вважається, що відновлене залізо науглецюється за хімічною реакцією (2), при цьому в джерелах [10, 11] зазначається, що процес науглецювання відбуватиметься поряд із процесом відновлення заліза газом CO за температур, числові значення яких вищі за 400-500°C, а в роботах [12, 13] стверджується, що оксид вуглецю (CO) вступає в реакцію з чистим залізом в інтервалі температур 900-1000°C.

Крім того, можливо, що при взаємодії заліза з газом CO продуктом реакції може бути не діоксид вуглецю (CO₂), а кисень (O₂), при цьому сама реакція науглецювання матиме вигляд, який дещо відрізняється від реакції (2):



З урахуванням даної обставини підсумкова реакція (5) процесу відновлення з вюститу заліза з його науглецюванням до стану чавуну, що складається з окремих реакцій (стадій) непрямого відновлення заліза (реакція (1)) та його науглецювання (реакція (4)) газом CO, також буде мати трохи інший вид (у порівнянні з реакцією (3)):



Тобто процес науглецювання заліза при його відновленні газом CO теоретично може відбуватися за такими двома схемами:

1. реакція (1) + реакція (2) = реакція (3) або
2. реакція (1) + реакція (4) = реакція (5).

Тому з метою з'ясування можливості перебігу всіх хімічних реакцій зазначених схем при температурах робочого простору відновних печей необхідним є їхній термодинамічний аналіз для визначення діапазону числових значень температур перебігу T_{np} цих реакцій. Термодинамічний аналіз передбачає виведення формул для розрахунку вільної енергії Гіббса ΔG_m^o і знаходження за їх допомогою числових значень граничних температур T_{gr} для реакцій (2)-(5) науглецювання відновленого заліза газом CO (реакція (1) є реакцією непрямого відновлення заліза із вюститу газом CO, її термодинамічний аналіз був виконаний автором при аналізі процесу відновлення заліза із гематиту газом CO [14-19]).

Метою даної роботи є термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій (2)-(5) науглецювання газом CO заліза при його непрямому відновленні з вюститу за рахунок газу CO з попереднім виведенням формул розрахунку вільної енергії Гіббса для знаходження числових значень граничних (рівноважних) температур, які дозволять визначити діапазон числових значень теоретичних температур, в якому перебіг зазначених реакцій термодинамічно можливий.

Методика досліджень. Для розрахунку граничних температур T_{gr} автором були виведені та використані вирази для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса (ізобарно-ізотермічного потенціалу) ΔG_m^o залежно від температури T для зазначених вище хімічних реакцій (1)–(5) відновлення та науглецювання заліза газом CO (приймаємо, що FeO, Fe та Fe₃C знаходяться у твердому стані); для здійснення обчислень за їх допомогою та обробки отриманих результатів задіяно комп'ютерну програму MS Excel 2013.

Виведення розрахункових формул для розрахунку температурно-залежних числових значень енергії Гіббса ΔG_m^o здійснювалося за методикою, що описана в літературних джерелах [20, 21], із застосуванням наявних у літературі [22] стандартних значень ентальпій утворення неорганічних речовин $\Delta H_{f,298}^o$ та їх ентропій S_{298}^o ; числові значення необхідних з них (тих, які беруть участь у процесах відновлення і науглецювання заліза газом CO) наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Стандартні значення $\Delta H_{f,298}^o$ і S_{298}^o

Речовина	Стан	$\Delta H_{f,298}^o$, кДж/моль	S_{298}^o , Дж/(моль·К)
FeO	кристалічний	– 264,8	60,8
Fe	кристалічний	0	27,15
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
CO ₂	газ	– 393,51	213,67

Методика виведення формул [20, 21] для обчислення температурно-залежних числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m^o полягає в наступному.

Будь-який хімічний процес, як відомо [23], характеризується ентальпійним (ΔH^o) і ентропійним ($T \cdot \Delta S^o$) факторами, які діють одночасно, але протилежні один одному. Їх підсумковий ефект у процесах, що відбуваються при постійному тиску і певних температурах, визначає зміну числового значення вільної енергії Гіббса ΔG_m^o .

Числові значення вільної енергії Гіббса ΔG_m^o в залежності від температури T (у К), виходячи із наслідків закону Гесса, знаходяться для будь-якої хімічної реакції за такою формулою [20, 21]:

$$\Delta G_m^o = \Delta H^o - T \cdot \Delta S^o, \quad (6)$$

де ΔH^o і ΔS^o – числові значення ентальпії (Дж/моль) і ентропії (Дж/(моль·К)) аналізованої хімічної системи (реакції) відповідно; знаходяться за такими виразами [20, 21]:

$$\Delta H^o = \sum \Delta H_{prod}^o - \sum \Delta H_{poc}^o = (e \cdot \Delta H_5^o + d \cdot \Delta H_4^o + c \cdot \Delta H_3^o) - (b \cdot \Delta H_2^o + a \cdot \Delta H_1^o); \quad (7)$$

$$\Delta S^o = \sum \Delta S_{prod}^o - \sum \Delta S_{poc}^o = (e \cdot \Delta S_5^o + d \cdot \Delta S_4^o + c \cdot \Delta S_3^o) - (b \cdot \Delta S_2^o + a \cdot \Delta S_1^o), \quad (8)$$

де $\sum \Delta H_{prod}^o$ і $\sum \Delta H_{poc}^o$ – суми стандартних ентальпій утворення відповідно продуктів реакції і початкових речовин, Дж/моль; $\sum \Delta S_{prod}^o$ і $\sum \Delta S_{poc}^o$ – суми стандартних ентропій відповідно для продуктів реакції і початкових речовин, Дж/(моль·К); ΔH_1^o , ΔH_2^o і ΔH_3^o , ΔH_4^o , ΔH_5^o та ΔS_1^o , ΔS_2^o і ΔS_3^o , ΔS_4^o , ΔS_5^o – стандартні ентальпії утворення (ΔH^o , Дж/моль) початкових речовин і продуктів реакції та їх ентропії (ΔS^o , Дж/(моль·К)) відповідно (див. табл. 1); a , b , c , d , e – коефіцієнти стехіометрії хімічної системи (параметри ΔH_5^o і ΔS_5^o з коефіцієнтом e будуть характерними тільки для хімічної реакції (5)).

Виклад основного матеріалу. Формула для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m^o хімічної реакції (1) залежно від температури T (у К), що виведена автором у роботах [16, 18], має такий вигляд:

$$\Delta G_m^o(1) = -18190 + 17,52 \cdot T, \text{ Дж/моль СО} \quad (\text{I})$$

Формули для розрахунку числових значень енергії Гіббса ΔG_m^o хімічних реакцій (2)-(5) залежно від температури T (у К), що виведені автором, відповідно мають такий вигляд:

$$\Delta G_m^o(2) = -73735 + 78,88 \cdot T, \text{ Дж/моль СО}; \quad (\text{II})$$

$$\Delta G_m^o(3) = -40408 + 42,06 \cdot T, \text{ Дж/моль СО}; \quad (\text{III})$$

$$\Delta G_m^o(4) = 135520 + 71,37 \cdot T, \text{ Дж/моль СО}; \quad (\text{IV})$$

$$\Delta G_m^o(5) = 20237,5 + 30,98 \cdot T, \text{ Дж/моль СО} \quad (\text{V})$$

При цьому теоретичні числові значення граничних температур T_{cp} для хімічних реакцій (1)-(5) можна визначити з виразу $t = \Delta H^o / \Delta S^o - 273$, °С, використовуючи отримані рівняння (I)-(V), тобто для умови хімічної рівноваги $\Delta G_m^o = 0$ кожної із реакцій (1)-(5).

Залежності числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m^o від температури T (у °С) для хімічних реакцій (1)-(3) ілюструє рис. 1; ці залежності побудовані згідно з проведеними розрахунками ΔG_m^o для зазначених реакцій за виведеними автором виразами (I)-(III). Мимовільний їх перебіг в прямому напрямку буде термодинамічно можливим при виконанні умови $\Delta G_m^o < 0$. Згідно з отриманими автором виразами (I)-(III) остання умова для реакцій (1)-(3) виконуватиметься при наступних числових значеннях температур перебігу процесів T_{np} , які в усіх випадках будуть нижчими за обчислене для кожної конкретної із зазначених хімічних реакцій теоретичне числове значення граничної температури T_{cp} (див. рис. 1):

- для реакції (1): $T_{cp} = 765,242^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$;
- для реакції (2): $T_{cp} = 661,774^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$;
- для реакції (3): $T_{cp} = 687,631^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$.

Умова $\Delta G_m^o < 0$ для реакцій (4) і (5), згідно з отриманими автором виразами (IV) і (V), виконуватиметься при наступних числових значеннях температур перебігу процесів T_{np} , які в усіх випадках будуть також нижчими за обчислене для кожної із зазначених хімічних реакцій теоретичне числове значення граничної температури T_{cp} :

- для реакції (4): $T_{cp} = -2171,837^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$;
- для реакції (5): $T_{cp} = -926,191^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$.

Таким чином, проведений термодинамічний аналіз дозволив встановити, що хімічні реакції науглецювання монооксидом вуглецю заліза (реакція (2)) та його непрямого відновлення з подальшим науглецюванням (реакція (3)) газом СО можуть мимовільно перебігати як при всіх негативних значеннях температур, так і в інтервалі їх невисоких позитивних значень – відповідно до $661,774^\circ\text{C}$ і до $687,631^\circ\text{C}$ (рис. 1). Проте за більш високих температур робочого простору відновлювальних печей перебіг зазначених реакцій термодинамічно неможливий. При цьому, для хімічної реакції (3), яка складається з 2-х стадій, що описуються хімічними реакціями (1) і (2), лімітуючою стадією, як видно з результатів термодинамічних розрахунків, є стадія науглецювання, яка описується реакцією (2). Тобто, незважаючи на те, що відновлення заліза з вюститу газом СО (див. реакцію (1)) за даними автора термодинамічно можливе до $765,242^\circ\text{C}$ (за даними різних літературних джерел – до $572-777^\circ\text{C}$ [14-19], за даними роботи [24] – до $\approx 327^\circ\text{C}$), і реакція (3) термодинамічно може перебігати при всіх значеннях температур тільки до $687,631^\circ\text{C}$, науглецювання відновленого заліза газом СО можливе лише при значеннях температурах, що нижчі за $661,774^\circ\text{C}$. При цьому ступінь науглецювання відновленого заліза через низьку концентрацію СО у відхідному пічному газі (це підтверджують термодинамічні умови перебігу реакції Белла-Будуара, що зазначені нижче) буде мізерно мала, що також добре кореспондується із джерелом [6] (див. вище).

Беручи до уваги ті факти, що відновлене залізо зазвичай відсутнє у зонах з температурами, значення яких нижчі за $661,774^\circ\text{C}$, а реакція Белла-Будуара теоретично (термодинамічно) може

перебігати при температурах, що, згідно даних [16-19], які отримані автором, вищі за 709°C (згідно з різними літературними даними, що наведені у роботах автора [14, 15, 18, 19], ці температури вищі за 557°C або вищі за 697°C, або вищі за 699°C, або вищі за 706°C, або вищі за 748°C, або вищі за 750°C), а також враховуючи більш високі значення температур (близько 1200°C [25]) у зоні робочого простору металургійних печей, де починається процес відновлення заліза, можна зробити висновок, що процес науглецювання відновленого заліза за допомогою газу CO взагалі не буде відбуватися у відновних печах.

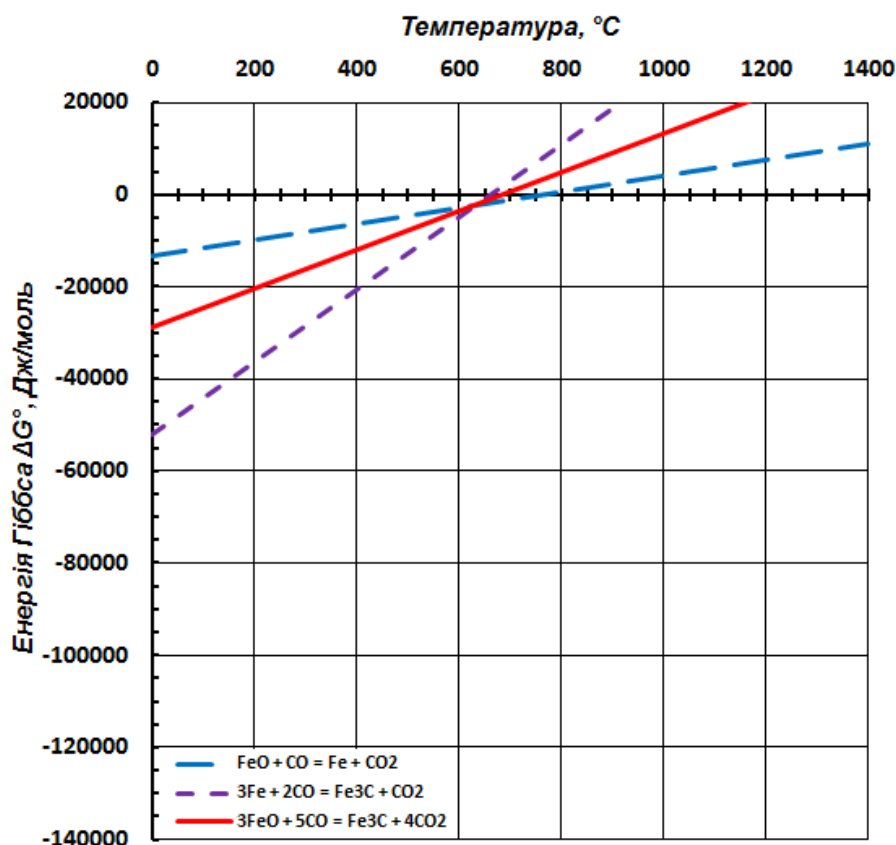


Рис. 1 – Залежність величини вільної енергії Гіббса ΔG_m° від значень температури T для реакцій (1)-(3), що розраховані за виведеними автором формулам (I)-(III)

Хімічна реакція науглецювання (4) і підсумкова хімічна реакція відновлення та науглецювання (5) відновленого заліза за рахунок газу CO взагалі не можуть перебігати при температурах, що можливі у природі, адже теоретичні температури перебігу цих реакцій, що отримані розрахунком, мають числові значення, що нижчі за $-2171,837^\circ\text{C}$ і нижчі за $-926,191^\circ\text{C}$ відповідно. Тобто це свідчить також про неможливість термодинамічного перебігу реакцій (4) і (5) за будь-яких температур робочого простору відновлювальних печей.

Висновки

Результати проведеного у роботі термодинамічного аналізу з використанням виведених автором виразів (I)-(V) для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m° хімічних реакцій (1)-(5) дозволили визначити термодинамічні умови процесу науглецювання відновленого заліза у металургійних відновних печах за допомогою газу CO.

Встановлено, що науглецювання відновленого заліза газом CO за хімічними реакціями (4) і (5) неможливе у робочому просторі відновлювальних печей, оскільки зазначені реакції термодинамічно не можуть перебігати при всіх температурах, що можливі у природі.

Науглецювання відновленого заліза за допомогою газу CO термодинамічно можливе за

хімічною реакцією (3), яка складається з 2-х окремих стадій – відновлення заліза і наступного його науглецювання монооксидом вуглецю, що описуються відповідно хімічними реакціями (1) і (2), однак лише при числових значеннях температури процесу, які нижчі за 662°C. При цьому через низьку концентрацію CO у відхідному пічному газі ступінь науглецювання заліза в цьому випадку буде мізерно мала.

Беручи до уваги, що відновлене залізо зазвичай відсутнє у зонах з температурами, значення яких нижчі за 662°C, враховуючи термодинамічні умови перебігу хімічної реакції газифікації твердого вуглецю (Белла-Будуара) та більш високі значення температур (близько 1200°C) у зоні робочого простору металургійних печей, де починається процес відновлення заліза, можна зробити висновок, що процес науглецювання відновленого заліза за допомогою газу CO взагалі не буде відбуватися.

Це спростовує твердження деяких авторів, що науглецювання відновленого заліза газом CO у відновних печах можливе при температурах 950-1150°C або близьких до них (у тому числі й за рахунок сажистого вуглецю, що утворюється при температурах, значення яких є нижчими за значення рівноважної температури для хімічної реакції Белла-Будуара), підтверджуючи загальновідомий висновок про те, що науглецювання відновленого заліза до стану чавуну у металургійних печах відбувається виключно за рахунок твердого вуглецю.

Проведений термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання відновленого заліза газом CO буде сприяти правильному розумінню процесу прямого відновлення заліза (газом CO і твердим вуглецем коксу або вугілля) з подальшим його науглецюванням у металургійних відновних печах з метою створення істинної фізико-хімічної моделі цього процесу. Це необхідно також для подальшого теоретичного обґрунтування та промислової розробки іновативних технологій одностадійного отримання безпосередньо із залізовмісної сировини рідкої сталі замість рідкого чавуну (або його гранульованого аналога), тобто виключивши (як це здійснювалося у давнину в різних конструкціях сиродутних горнів) проміжну стадію отримання чавуну, що в сучасних відновних печах не вдається здійснити до сьогодення, незважаючи на існування у світовому металургійному виробництві різноманітних технологій прямого відновлення заліза.

Перелік використаних джерел:

1. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Київ : Вища школа, 1974. 288 с.
2. Morita K., Sano N. 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/10.1533/9781845690946.1.82>.
3. Літовченко П. І., Іванова Л. П. Технологія конструкційних матеріалів: навч. посіб. Харків : НА НГУ, 2016. 306 с.
4. Поляков О. І., Гасик М. І. Електрометалургія феросплавів, спеціальних сталей і сплавів. Дніпропетровськ : Журфонд, 2009. 116 с.
5. Демченко М. Т., Харченко В. В. Системи технологій промисловості: стислий конспект лекцій. Донецьк : ДонДУУ, 2011. 91 с.
6. Study of iron carburization in CO-based gas mixtures. URL: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/6980 (дата звернення: 07.10.2024 р.).
7. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 148 с.
8. Мовчан В. П., Бережний М. М. Основи металургії. Дніпропетровськ : Пороги, 2001. 336 с.
9. Доменний процес / В. М. Ковшов та ін. Дніпропетровськ : Інститут Технології, 1998. 212 с.
10. Peasey 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>.
11. 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>.
12. Geerdes M., Toxopeus H., van der Vliet C. Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction.

- Amsterdam: IOS Press, 2009. 164 p. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-040-7-i>.
13. Ковшов В. Н., Петренко В. А., Верещак В. И. Моделирование доменного процесса. Днепропетровск : Институт технологии, 1997. 109 с.
 14. Пантейков С. П. О температурах протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO с позиций термодинамики. *Trends of development modern science and practice* : Abstracts of the IX-th International Scientific and Practical Conference, Stockholm, Sweden, 16-19 November 2021. Pp. 568-574.
 15. Пантейков С. П. О влиянии степени химического сродства веществ к кислороду на возможность протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO. *Science foundations of modern science and practice* : Abstracts of the the X-th International Scientific and Practical Conference, Athens, Greece, 23-26 November, 2021. Pp. 640-648.
 16. Пантейков С. П. Определение температур протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO и газификации твёрдого углерода по стандартным значениям энтальпии и энтропии. *Modern aspects of science and practice* : Abstracts of the XI-th International Scientific and Practical Conference, Melbourne, Australia, 30 November – 03 December 2021. Pp. 558-564.
 17. Пантейков С. П. Определение температур протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO и газификации твёрдого углерода по степени химического сродства веществ к кислороду. *Perspectives of development of science and practice* : Abstracts of the XIII-th International Scientific and Practical Conference, Prague, Czech Republic, 14-17 December 2021. Pp. 601-610.
 18. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO 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. Том 2(39). С. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2>.
 19. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO 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>.
 20. Лобурець А. Т. Навчальний посібник «Хімічна термодинаміка» для студентів підготовки бакалавра спеціальності 144 «Теплоенергетика» всіх форм навчання. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2016. 85 с.
 21. Цветкова Л. Б. Фізична хімія: теорія і задачі: навч. посібник. Львів : Магнолія, 2008. 415 с.
 22. Солдаткіна Л. М. Хімічна термодинаміка в схемах, таблицях, формулах, рисунках. Одеса: «Одеський національний університет», 2012. 101 с.
 23. Лебідь В. І. Фізична хімія. Харків: Фоліо, 2005. 478 с.
 24. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? URL: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-bette> (дата звернення: 07.10.2024 р.).
 25. 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, г. Харьков, 8-9 апреля 2009 г. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. С. 72-73.

References:

1. Н.Н. Yefymenko, A.A. Hymmelfarb, and V.E. Levchenko, *Metallurhyia chuhuna* [Cast iron metallurgy]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 1974. (Rus.)
2. K. Morita, and N. Sano, «3-Phase diagrams, phase transformations, and the prediction of metal properties», *Fundamentals of Metallurgy: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, pp. 82-108, 2005. doi: 10.1533/9781845690946.1.82. (Eng.)
3. P.I. Litovchenko, and L.P. Ivanova, *Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: navch. posib.* [Technology of structural materials: textbook]. Kharkiv, Ukraine: NA NHU Publ., 306 p., 2016. (Ukr.)
4. 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.)
5. M.T. Demchenko, and V.V. Kharchenko, *Systemy tekhnolohii promyslovosti: styslyi konspekt lektsii* [Industrial Technology Systems: Lecture Notes]. Donetsk, Ukraine: DonDUU Publ., 2011. (Ukr.)
 6. Study of iron carburization in CO-based gas mixtures. [Online]. Available: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/6980. Accessed on: October 07, 2024. (Eng.)
 7. V.O. Smirnov, and V.S. Biletskii, *Fizichni ta khimichni osnovi virobnitstva* [Physical and chemical principles of production]. Donetsk, Ukraine: Skhidnii vidavnychii dim Publ., 2005. (Ukr.)
 8. V.P. Movchan, and M.M. Berezhnyi, *Osnovi metalurgii* [Fundamentals of metallurgy]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Porogi Publ., 2001. (Ukr.)
 9. V.M. Kovshov et al., *Domennyi protses* [Blast furnace proces]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Instytut Tekhnolohii Publ., 1998. (Ukr.)
 10. 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. (Eng.)
 11. 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 modern theoretical and technological methods and equipment and prospects for the development of blast furnace loading»], *Teoriia i praktyka metalurhii – The Theory and Practice of Metallurgy*, № 4(135), pp. 30-45, 2022. doi: 10.34185/tpm.4.2022.05. (Ukr.)
 12. M. Geerdes, H. Toxopeus, and C. van der Vliet, *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*. Amsterdam, Netherland: IOS Press Publ., 2009. doi: 10.3233/978-1-60750-040-7-i. (Eng.)
 13. V.N. Kovshov, V.A. Petrenko, and V.I. Vereshchak, *Modelirovanie domennogo protsessa* [Modeling of the blast furnace process]. Dnepropetrovsk, Ukraine: Institut tekhnologii, 1997. (Rus.)
 14. S.P. Panteikov, «O temperaturakh protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO s pozytsyi termodinamyky» [«On the temperatures of the reaction of reduction of iron from hematite by CO gas from the point of view of thermodynamics»], in Proc. IX-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Trends of development modern science and practice», Stockholm, Sweden, 2021, pp. 568-574. (Rus.)
 15. S.P. Panteikov, «O vliyaniy stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu na vozmozhnost protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO» [«On the influence of the degree of chemical affinity of substances for oxygen on the possibility of reactions of reduction of iron from hematite by CO gas»], in Proc. X-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Science foundations of modern science and practice», Athens, Greece, 2021, pp. 640-648. (Rus.)
 16. S.P. Panteikov, «Opredelenye temperatur protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO y hazyfykatsyy tvordogo uhleroda po standartnym znacheniyam entalpiy y entropyy» [«Determination of reaction temperatures for the reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon using standard enthalpy and entropy values»], in Proc. XI-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Modern aspects of science and practice», Melbourne, Australia, 2021, pp. 558-564. (Rus.)
 17. S.P. Panteikov, «Opredelenye temperatur protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO y hazyfykatsyy tvordogo uhleroda po stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu» [«Determination of reaction temperatures for the reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon based on the degree of chemical affinity of substances for oxygen»], in Proc. XIII-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Perspectives of development of science and practice», Prague, Czech Republic, 2021, pp. 601-610. (Rus.)
 18. 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 standartnymi znachenniyami entalpii ta entropii rehovyn» [«Calculation of the temperatures of chemical reactions of the process of stepwise reduction of iron from hematite by 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.)
 19. S.P. Panteikov, «Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho

- vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rechovyn do kysniu» [«Calculation of the temperatures of chemical reactions of the process of stepwise reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon based on measures of the chemical affinity of substances to oxygen»], *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, vol. 1(2), pp. 1-8, 2022. doi: 10.46299/j.isjea.20220102.1. (Ukr.).
20. A.T. Loburets, *Navchalnyi posibnik «Khimichna termodinamika» dlya studentiv pidgotovki bakalavra spetsialnosti 144 «Teploenergetika» vsikh form navchannya* [Textbook «Chemical Thermodynamics» for students of Bachelor's degree in specialty 144 "Heat Power Engineering" of all forms of study]. Poltava, Ukraine: PNTU im. Yu. Kondratyuka Publ., 2016. (Ukr.)
21. L.B. Tsvetkova, *Fizychna khimiia: teoriia i zadachi: navch. posibnyk* [Physical chemistry: theory and tasks: textbook]. Lviv, Ukraine: Mahnoliia Publ., 2008. (Ukr.)
22. L.M. Soldatkina, *Khimichna termodinamika v skhemakh, tablytsiakh, formulakh, rysunkakh* [Chemical thermodynamics in diagrams, tables, formulas, figures]. Odesa, Ukraine: Odeskyi natsionalnyi universytet Publ., 2012. (Ukr.)
23. V.I. Lebid, *Fizychna khimiia* [Physical chemistry]. Kharkiv, Ukraine: Folio Publ., 2005. (Ukr.)
24. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? [Online]. Available: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-better>. Accessed on: October 03, 2024. (Eng.)
25. Ya.V. Stovba, V.V. Pereskoka, and L.V. Kamkina, «Ocenka vozmozhnosti ispolzovaniya zhelezo- i marganecsoderzhashih othodov dlya polucheniya uglerodistogo ferromarganca» [«Evaluation of the possibility of using iron- and manganese-containing waste to obtain carbonaceous ferromanganese»], in Proc. VI-th Int. Conf. «Cooperation to Solve the Waste Problem», Kharkov, Ukraine, 2009, pp. 72-73. (Rus.)

Стаття надійшла 02.11.2024

Стаття прийнята 23.11.2024

УДК 621.74.002: 669.001.2

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321259

© Дан Л.О.¹, Трофімова Л.О.², Павленко П.В.³

ЩОДО ОДНОГО З ШЛЯХІВ ЕКОНОМІЇ МЕТАЛУ ПРИ ВІДЛИВАННІ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКІВ

Дана стаття присвячена аналізу шляхів зменшення витрат металу при відливанні сталевих зливок. Наведені чинники, що стосуються необхідності використання додаткового об'єму металу в верхній частині зливку та кількісні дані стосовно витрат металу на додатки. Проаналізовано тепловий баланс додатку, що твердне, та зроблено висновки щодо необхідності утримання додатку в рідкому стані як можна довше. На підставі літературних даних вказано на два шляхи можливого поліпшення теплової роботи додатків, за рахунок чого може бути зменшений їх об'єм. Перший – максимально ефективно використовувати тепло, що містить в собі рідкий метал додатку. Другий – збільшення тепловмісту розплаву в додатку за рахунок зовнішніх джерел. Розглянуті способи внесення тепла до металу додатку: електродуговий, індукційний, газокисневий, електрошлаковий та інші. Обґрунтовано проведення експериментів по відливанню сталевих зливок зі зменшеною додатковою частиною в

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0002-1954-4871, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, pasha107107@gmail.com

умовах її електродугового обігріву та описані умови проведення експериментів. На підставі експериментальних даних побудовано криві твердіння металу дослідних і контрольних зливок. Показано, що за умов електродугового обігріву навіть зменшений вдвічі додаток забезпечує більш тривалий час твердіння дослідного зливка в порівнянні з контрольним. Встановлено також, що електродуговий обігрів додатку забезпечує підвищення щільності металу головної частини і зменшення ліквідації сірки всередині зливку. Зроблено висновки про те, що електродуговий обігрів металу додаткової частини зливку дозволяє зменшити її об'єм вдвічі без погіршення щільності і однорідності металу зливка. Це має позитивні технічні, економічні та екологічні наслідки.

Ключові слова: зливки, додаток, усадкова раковина, електродуговий обігрів.

L. Dan, L. Trofimova, P. Pavlenko. On the way to save metal during the steel ingot casting process. This article analyzes ways to reduce metal usage in steel ingot casting. Factors related to the need to use an additional metal volume in the upper part of the ingot and quantitative data on metal consumption for additives are presented. The heat balance of the solidifying additive is analyzed, and conclusions are drawn regarding the need to keep the additive in the liquid state as long as possible. Based on literature data, two ways of potential improvement of the thermal performance of additives are indicated, which can reduce their volume. The first is to maximize the use of heat contained in the liquid metal of the application. The second is to increase the heat content of the melt in the application using external sources. The methods of heat application to the metal of the application are considered: electric arc, induction, gas-oxygen, electro-slag, and others. Experiments on casting steel ingots with a reduced additional part under conditions of its electric arc heating are substantiated and the conditions of experiments are described. Based on the experimental data, the experimental and control ingot's metal solidification curves were plotted. It is shown that under the conditions of electric arc heating, even a halved additive provides a longer solidification time for the experimental ingot compared to the control one. It has also been established that electric arc heating of the additive provides an increase in the density of the metal of the head part and a decrease in the sulfur liquidation inside the ingot. It is concluded that electric arc heating of the metal of an additional part of the ingot can reduce its volume by half without degrading the density and homogeneity of the ingot metal. This has positive technical, economic, and environmental impacts.

Keywords: ingot, overflow, shrinkage sink, electric arc heating.

Постановка проблеми. Виробництво високоякісних товстих сталевих листів і плит, великогабаритних поковок відповідального призначення можливе тільки зі зливок, тому вимоги до якості внутрішньої будови таких зливок безперервно зростають разом зі зростанням вимог до надійності одержуваних з них виробів. Неоднорідність розмірів, форми і розподілу кристалів в об'ємі зливка, пористість і хімічна неоднорідність є основними проблемами під час отримання якісного зливка. Крім того, глибина усадкової раковини у великих зливках становить 10-20% їхньої довжини, внаслідок чого значна частина металу (до 10% за масою) йде у відходи. Це помітно збільшує собівартість кінцевої продукції [1-6].

Як відомо, для локалізації усадкової раковини за межами зливку і максимальне підживлення рідким металом тіла зливка використовують додатки. Також доведено, що об'єм і форма усадкової раковини в верхній частині зливка спокійної сталі залежить між іншим від конфігурації додатку, конструкції додаткової надставки, умов тепловідводу через футерування надставки, утеплення дзеркала металу та інших факторів. Докладний аналіз останнього твердження відкриває широкі можливості у керуванні процесом затвердіння сталевих зливок та підвищення ефективності роботи його додатку. За правильно обраних параметрів і конструкції додаткової надставки, а також за збільшення часу перебування металу в додатку в рідкому стані зменшується кількість відходів від зливка.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тривалість збереження металу в додатку в рідкому стані залежить від інтенсивності відведення тепла, що здійснюється через футеровку і

каркас прибуткової надставки, за рахунок випромінювання з поверхні дзеркала металу в додатку і за рахунок передачі тепла в тіло зливка. Тепловий баланс додатку включає низку статей видаткової (q_{Σ}) і прибуткової (Q_{Σ}) частин [1]:

$$q_{\Sigma} = Q_{\Sigma} \text{ чи:} \\ q_1 + q_2 + q_3 + q_{\text{ін}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{\text{вн}}, \quad (1)$$

де q_1 – втрати тепла через дзеркало металу;
 q_2 – кількість тепла, що йде на нагрівання футерування та каркасу надставки, й втрати тепла від поверхні каркасу в оточуючу середу;
 q_3 – тепло, передане в тіло зливка;
 $q_{\text{ін}}$ – інші втрати тепла;
 Q_1 – тепло перегріву рідкої сталі;
 Q_2 – тепло, що виділяється при затвердінні металу в додатку;
 Q_3 – тепло, що виділяється при охолодженні первинно затверділих об'ємів металу;
 $Q_{\text{вн}}$ – тепло, що внесене ззовні.

На підставі аналізу рівняння (1) виникає наступне. Частка теплових втрат, що припадають на кожну зі статей, може змінюватися залежно від умов футерування надставки, теплоізоляції дзеркала металу, конфігурації та розмірів надставки і кількості металу в додатку. Встановлено [1], що найбільше тепла втрачається через футерування надставки (75-85%). Теплові втрати через дзеркало металу становлять 15-25%. Таким чином, перший напрямок підвищення ефективності додатку – це зменшення теплових втрат.

Значного зниження теплових втрат додатку можна досягти вже простим його засипанням теплоізолюючою сумішшю (зола, шлак, відпрацьована формувальна суміш тощо). Якщо одночасно ізолювані бічна поверхня і дзеркало металу в додатку, то час її затвердіння значно збільшиться і для різних ливарних сплавів стане приблизно однаковим [2]. Для теплової ізоляції стінок додатків застосовують різні матеріали (шамот, деревне вугілля, мати з базальтового волокна тощо), які мають низьку теплоакумулюючу здатність.

Таким чином, вже при правильному застосуванні теплоізоляційних облицювань істотно зменшується розмір додатку за рахунок збереження акумульованого ним тепла.

Другий висновок, що можна зробити аналізуючи рівняння (1), – ефективним способом підвищення якості роботи додатку слід визнати збільшення тепловмісту рідкого металу в ньому, тобто за рахунок складової $Q_{\text{вн}}$ в рівнянні (1).

Існує декілька способів внесення тепла до рідкого металу додатку (рис. 1) [7-13].

Нижче охарактеризовано кілька з них, що є найбільш уживаними.

Електродуговий обігрів. Ще в 1895 р. інженер Н. Г. Славянов з метою збільшення виходу придатного запропонував підтримувати головну частину зливка в процесі затвердіння в рідкому стані шляхом обігріву її електричною дугою. Пізніше цей метод набув поширення на низці заводів Німеччини, Англії, Америки, а також широко випробувався в країнах східної Європи.

При електродуговому обігріві додатку використовують як змінний, так і постійний струм. Сутність методу зводиться до такого: після наповнення зливка на поверхню металу опускають електрод і запалюють дугу, після чого під електрод дають шлакоутворювальну суміш; шлак захищає метал від окислювання киснем повітря, а також закриває дугу, запобігаючи тепловипромінюванню в навколишнє середовище та сліпучій дії на тих, хто працює.

Установка для електродугового обігріву складається з джерела електроенергії, пристрою для автоматичного регулювання потужності та механізму для автоматичного переміщення електрода. На установці заводу «Електросталь» здійснювали обігрів зливків масою 200, 300 і 500 кг. Для обігріву застосовували графітовані електроди діаметром 75 мм. Зміна потужності в часі здійснювалася програмними механізмами. Швидкість переміщення електродів у вертикальному напрямку становила 1 м/год [14].

Електродуговий обігрів додаткової частини можна проводити як із застосуванням додаткової надставки, так і без неї. Наприклад, на заводі «Електросталь» застосовували укорочені порівняно зі звичайними додаткові надставки [14].



Рис. 1 – Способи підведення тепла до додатку [7-13]

Вплив електродугового обігріву на зміну хімічного складу сталі не виявлено. Навуглецювання металу від електродів спостерігалось лише в окремих випадках у результаті неполадок у процесі обігріву.

Застосування електродугового обігріву на зливках швидкорізальних, неіржавіючих та інших марок сталі без погіршення макроструктури зливка дає змогу збільшити вихід придатного під час переділу на заготівлю на 6-8% у результаті зменшення головного обрізу.

На заводі «Дніпроспецсталь» електрообігрів додатку зливка масою 2,8 т за суворого дотримання встановленого режиму дає можливість зменшити витрати металу на 5-7% [14].

Установка для електродугового обігріву великих зливків є на Дніпровському металургійному комбінаті. Дуговий обігрів великої кількості злитків неіржавіючої сталі масою 6 т показав, що головний обріз знижується з 17-18 до 10-12% без погіршення макроструктури піддодаткової частини зливка. При цьому витрати електроенергії становили в середньому 17 кВт·год/т, а зменшення обрізу верхньої частини зливка при прокаті – 6-7% [15-18].

Таким чином, застосування електродугового обігріву головної частини зливків показало, що цей спосіб дає можливість значно зменшити величину головного обрізу під час прокатки без погіршення будови зливка [19-21].

Індукційний обігрів. Індукційний спосіб обігріву додатку заснований на принципі використання струмів високої частоти для нагрівання металу. У додаткову надставку поміщається індуктор, по якому після наповнення додатку металом пропускають струм високої частоти, що збуджує в металі струми, які нагрівають його і підтримують у рідкому стані необхідний час. Установка для індукційного обігріву додатку працювала на Донецькому металургійному заводі. Джерелом живлення установки слугував електромашинний генератор високої частоти. Об'єм додатку становив лише 7-9% від загального об'єму зливка. У результаті тривалої промислової експлуатації установки для індукційного обігріву було отримано такі показники: витрата електроенергії на обігрів 14-18 кВт·год/т, зменшення головного обрізу з 16-18 до 5-9%.

До числа позитивних сторін цього способу належить можливість змінювати в широких межах тривалість та інтенсивність обігріву. Крім того, він не викликає забруднення сталі та підвищення хімічної неоднорідності зливка [21].

Газокисневий обігрів. Сутність газокисневого обігріву додатку полягає в тому, що після наповнення додаткової надставки метал у ній підтримується певний час у рідкому стані шляхом обігріву зверху полум'ям газокисневого пальника. Як пальне використовується природний або коксовий газ.

Досліди з газокисневого обігріву на території України було розпочато ще в 1951 р., їх проводили на заводах «Дніпроспецсталь», «Азовсталь» на 7-т зливках рейкової сталі, на 2,8- і 6-т зливках неіржавіючої сталі 1X18H9T. При цьому застосовували коксовий газ [20].

У результаті проведених дослідів було встановлено, що основною вимогою під час газокисневого нагріву є дотримання сталості співвідношення газ - кисень у газовій суміші. Щоб уникнути окислення легуючих елементів у верхній частині зливка, необхідно створити в додатковій надставці відновлювальну атмосферу, що досягається шляхом спалювання коксового газу за коефіцієнта надлишку повітря, що дорівнює 0,47. У зв'язку із зазначеними вимогами необхідно застосовувати тільки пальники з попереднім змішуванням газу і кисню [20].

Електрошлаковий обігрів. Способи електрошлакового обігріву і підживлення ґрунтуються на явищі виділення теплоти в розплаві шлаку при протіканні через останній електричного струму. Ефективність перетворення електричної енергії в теплоту під час електрошлакового процесу дуже висока, проте в сенсі передання теплоти металу він поступається індукційному нагріванню. Водночас способам електрошлакового обігріву і підживлення зливоків властиві простота необхідного обладнання і технологічна гнучкість. Тут можна застосовувати як постійний, так і змінний (одно- і трифазний) струм. Під час обігріву використовують один або кілька графітованих електродів, а під час підживлення – придатні для цього сталеві вироби (штанги, листову обрізку, ливники та ін.). Теплотою шлакової ванни вироби оплавляються і краплі електродного металу, пройшовши через шлак, змішуються з металом, що твердне у виливниці. Перевага електрошлакового способу – рівномірний обігрів шлаковою ванною поверхні металу в додатку і можливість металургійного впливу (десульфуріяція, асиміляція включень, ізоляція від атмосфери, а за умови підживлення – регулювання хімічного складу сталі в додатку) [22-24].

Електрошлаковий обігрів порівняно з електродуговим має низку переваг:

- більш високу стабільність електричних режимів;
- менше науглецювання металу головної частини;
- можливість рафінування металу;
- надійність захисту металу від вторинного окислення.

У процесі електрошлакового обігріву при інтенсивному надходженні тепла на дзеркало металеві ванни змінюється характер затвердіння головної частини зливка і динаміка утворення усадкової раковини [13, 25-30].

Мета статт – на підставі літературних та дослідних даних оцінити можливість зменшення витрат металу при відливанні сталевих зливоків за рахунок підживлення їх головної частини.

Виклад основного матеріалу. Експерименти проводили на сталі 45. Середній вміст елементів у сталі був: 0,46% C; 0,28% Si; 0,73% Mn; 0,025% P; 0,027% S; 0,02% Cr; 0,03% Mo і < 0,15% Ni.

Метал виплавили в електродуговій печі з основним футеруванням. Зі сталі однієї плавки відлили 2 восьмигранні ковальські зливки масою 17,9 т: дослідний і контрольний.

Під час відливання дослідного зливка після заповнення виливниці поверхню металу засипали флюсом, що складався з вапна, плавицевого шпату і магнезиту. Кількість флюсу – 1% від маси зливка. Застосування флюсу забезпечувало скорочення теплових втрат протягом усього експерименту. Крім того, наявність флюсу забезпечувала стійке горіння електричної дуги, за допомогою якої здійснювали обігрів додаткової частини зливка.

У процесі нагрівання (за методом Келлога [31]) використовували 1 металевий водоохолоджуєний електрод. Електрод опускали по осі зливка через шар флюсу. Для полегшення запалювання електричної дуги на робочу частину електрода напесовували графітову втулку. Процес вели на постійному струмі напругою 40 В, силою 1000 А (потужність 40 кВт) протягом 6,5 годин.

Контрольний зливкок тверднув за звичайною технологією із застосуванням для обігріву додаткової частини люнкеритного порошку.

Слід зазначити, що висота додаткової частини дослідного зливка була в два рази меншою, ніж контрольного.

Для того, щоб оцінити хід затвердіння злитка, їх піддали зондуванню стрижнем діаметром 12 мм [32, 33] – рис. 2. У певний момент часу стрижень занурювали в зливкок доти, доки не наштовхувався на опір затверділої його частини. Глибина занурення відзначалася і вимірювалася на стрижні після вилучення його зі зливка. Зливки, що обігріваються (дослідні), дають криву затвердіння, яка відрізняється від кривої затвердіння злитків, що не обігріваються (контрольних).

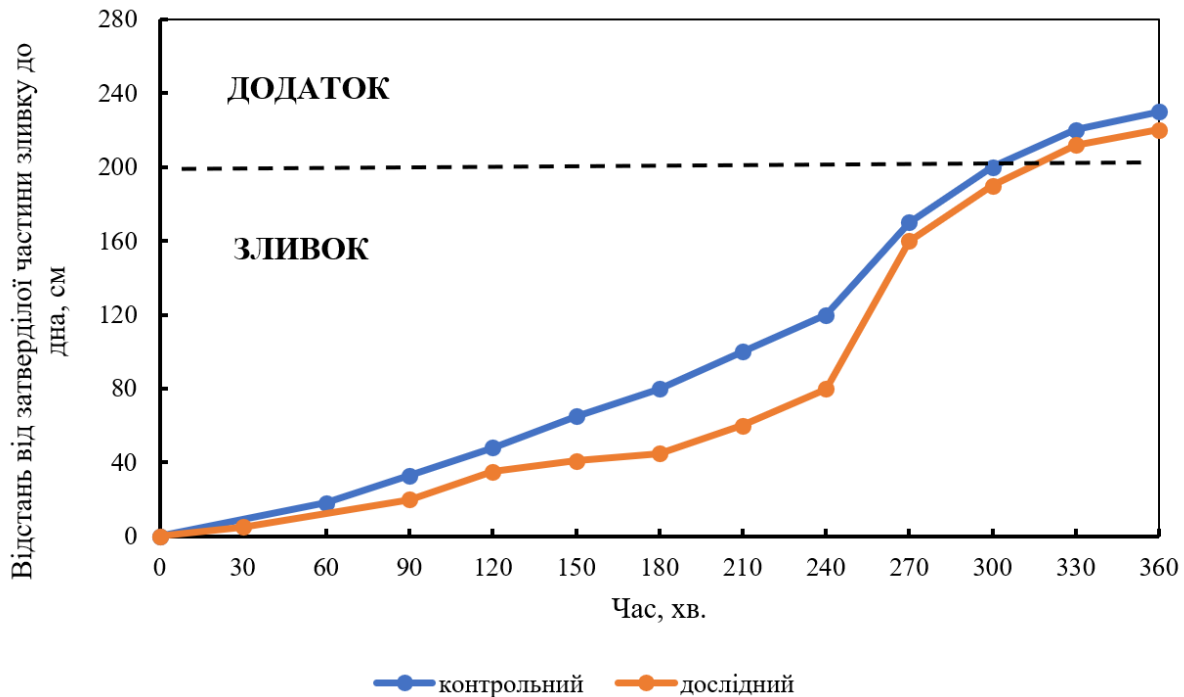


Рис. 2 – Результати зондування під час затвердіння контрольних і дослідних зливків (за даними [32, 33])

У початковий момент затвердіння в дослідних і контрольних зливках, що почалося знизу, протікає практично однаково. Через деякий час швидкість затвердіння збільшується, стає помітним бічне затвердіння, яке йде в напрямку від стінки виливниці. При переході до головної частини зливка крива затвердіння, внаслідок дії люнкеритного порошку або внаслідок обігріву, проходить полого.

Аналіз перебігу кривих затвердіння, побудованих по даних робіт [32, 33], для дослідних і контрольних злитків показує, що основний вплив обігріву додаткової зони чинить на метал середньої та головної частини і має незначний вплив на затвердіння нижчих зон. Криві рисунку 2 також свідчать про те, що за рахунок обігріву верхня частина дослідного зливка довше залишається рідкою, що має чинити позитивний вплив на формування усадкової раковини.

Для того, щоб з'ясувати вплив обігріву головної частини злитка на внутрішню будову зливка, були проведені дослідження пористості, форми усадкової раковини, ліквациї та первинної структури.

На рисунку 3 показано фотографії відбитків макроструктури головної частини контрольного і дослідного зливків.

З рисунку видно, що верхня частина дослідного зливка більш щільна ніж контрольного. Усадкова раковина в дослідному зливку практично відсутня, поверхня головної частини плавка. У сукупності зі зменшенням об'ємом металу в додатковій частині це спостереження вказує на перевагу дослідного зливка над контрольним.

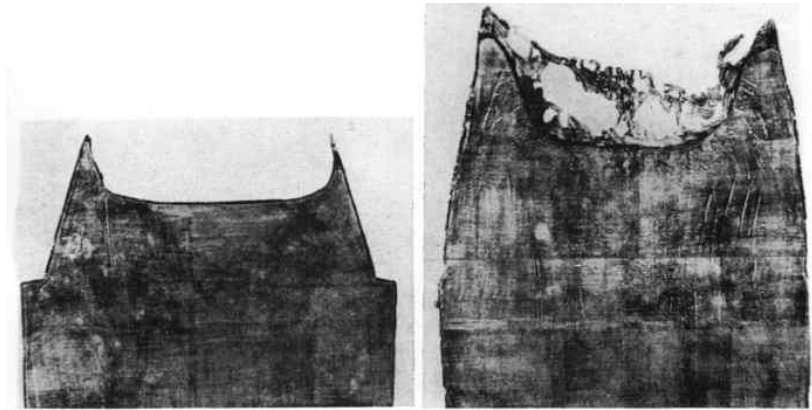


Рис. 3 – Відбитки макроструктури головної частини дослідного (зліва) та контрольного зливків (справа)

Фотографії сірчаних відбитків обох зливків наведені на рисунку 4.

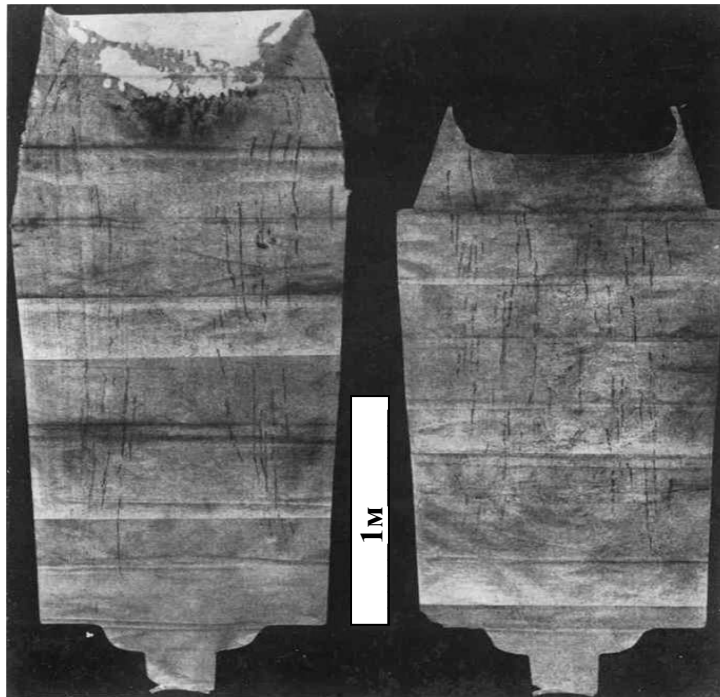


Рис. 4 – Сірчані відбитки контрольного (ліворуч) і дослідного (праворуч) зливків

На фотографіях ясно видно положення смуг ліквациї. Смуги ліквациї знаходяться в області рівноосних дендритів або в перехідній зоні від рівноосних дендритів до конуса осадження. Смуги ліквациї можуть перебувати також тільки в ділянці конуса осадження. Так, у злитка, що обігрівается (див. рис. 4), зліва, внизу можна виявити таку смугу. У донній частині злитків ліквацийні смуги розташовані в конусі осадження, причому у злитка, що обігрівается, ліквацийні смуги біля основи злитка зсунуті назовні, оскільки конус ширший. Однак із просуванням вгору вони різко зсуваються всередину. Крім того, ліквацийні смуги біля основи злитка, що обігрівается, не так різко виражені, як біля основи злитка, що не обігрівается. У середній і верхній частині злитка, що обігрівается, ліквацийні смуги більше зрушені всередину злитка і на противагу злитку, що обігрівается, розподілені рівномірно. Кількість і яскравість ліквацийних смуг при цьому в обох злитках практично однакові. Очевидно, що більш сприятливий розподіл ліквацийних смуг у дослідному зливку є наслідком обігріву головної частини зливку.

Висновки

1. Аналіз літературних даних показав, що одним із перспективних напрямів економії металу при відливанні сталевих зливків є застосування електрообігріву головної частини зливка, що дає змогу зменшити величину головного обрізу під час прокатки на 5-10% без погіршення будови злитка. Це дає можливість збільшити вихід придатного на 5-7% і поліпшити якість металу в головній частині злитка.

2. У результаті аналізу даних, отриманих під час порівняння контрольного і дослідного злитків ст. 45 масою 17,9 т, було встановлено, що електродуговий обігрів дає змогу зменшити об'єм додаткової частини зливка в 2 рази без погіршення якості металу.

Перелік використаних джерел:

1. Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Цупрун А. Ю. Крупный слиток: монография. Донецьк : Донецьк, 2009. 278 с.
2. Скребцов О. М. Затвердіння та властивості ливарних сплавів. Маріуполь : ПДТУ, 2003. 202 с.
3. Борисов В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. Київ : Наукова думка, 1987. 223 с.
4. Любов Б. Я. Теория кристаллизации в больших объемах. Київ : Наукова думка, 1975. 256 с.
5. Еланский Г. Н. Строение и свойства металлических расплавов. Київ : Вид. КПИ, 1991. 160 с.
6. Изготовление кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов. Часть II / В. В. Назартин и др. // *Металл и литье Украины*. 2012. № 2. С. 44-48.
7. Багмутов В. П., Жульев С. И., Захаров И. Н. Математическое моделирование и экспериментальное исследование физической неоднородности и напряженного состояния крупных стальных слитков. *Металл и литье Украины*. 2006. № 4. С. 14-19.
8. Ameling D., Lungen H. B., Wieland H.-J. The steel industry in Germany within the framework of the European Union. *MPT International*. 2006. № 3. Pp. 24-35.
9. High-performance steelmaking shop at Tokyo Steel, Japan. *Da News*. 2007. № 150. Pp. 1-2.
10. Карабасов Ю. С. Сталь на рубеже столетий. Днепропетровськ : Вид. ДНТУ, 2001. 664 с.
11. Баум Б. А., Хасин Г. А., Тягунов Г. В. Жидкая сталь. Донецьк : Вид. ДПИ, 1984. 208 с.
12. Mori T., Narita K. A study of the solidification of heavy carbon steel ingot. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1972. Vol. 12. № 2. Pp. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.12.83>.
13. Common J., Delorme J., Bastien P. Heterogeneity des gros lingots de forge etude de influence des impuretes et des elements d'alliage sur la segregation. *Revue de Metallurgie*. 1973. Vol. 70. № 4. Pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/197370040251>.
14. Смирнов О. М., Сафонов В. М. Виробництво зливків сталі та промислових сплавів: навчальний посібник. Донецьк : Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2013. 405 с.
15. Flemings M.C. Solidification processing. *Metallurgical transactions*. 1974. Vol. 5. № 10. Pp. 2121-2134. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02643923>.
16. Оно А. Затвердевание металлов. Київ : Вид. ІПЛ АН УРСР, 1980. 152 с.
17. Марченко И. К., Бровман М. Я. Производство крупных стальных слитков. Київ : Наукова думка, 1980. 240 с.
18. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. Київ : Наукова думка, 1972. 424 с.
19. Применение эффективных экзотермических смесей при разливке спокойной стали на крупные листовые слитки / А. А. Подгородецкий и др. *Металл и литье Украины*. 1989. № 3. С. 59-60.
20. Некоторые итоги исследований, связанных с освоением производства крупных и сверхкрупных слитков / В. Е. Ключарев и др. *Процессы разливки стали и качество слитка*. Київ : ИПЛ АН УССР, 1989. С. 12-16.
21. Исследование структуры кузнечного слитка массой 142 т / Баранова В. Н., Скок Ю. А., Ефимов В. А., Лубенец Г. А. *Процессы литья*. 1995. № 2. С. 28-38.
22. Качество слитка спокойной стали / М. И. Колосов и др. Київ : Наукова думка, 1973. 408 с.
23. Уббелоде А. Р. Расплавленное состояние вещества. Харків : Вид. ХПИ, 1982. 376 с.
24. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Периодическая кристаллизация стали. *Процессы литья*.

1995. № 1. С. 52-61.
25. Латаш Ю. В., Матях В. Н. Современные способы производства слитков особо высокого качества. Київ : Наукова думка, 1987. 336 с.
 26. Влияние технологических факторов разливки на дефектность осевых объемов крупных кузнечных слитков / Жульев С. И., Кряковский Ю. В., Основин В. А., Сперанская Г. Н. Усовершенствование процессов разливки стали. Труды 8 научно-техн. конф. Київ : ИПЛ АН УССР, 1981. С. 67-70.
 27. Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали: учеб. пособие. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. 192 с.
 28. Слиток и свойства стали: труды 5 конференции по физико-химическим основам производства стали / под. ред. А. М. Самарина. Київ : Видавництво АН УРСР, 1961. 180 с.
 29. Flemings M. C. Principles of Controls of Soundness and Homogeneity of Large Ingots. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1976. № 5. Pp. 1-15.
 30. Kohn A., Morillon G. L'étude mathématique de la solidification des lingot de poids de 12 tons en las et moyenne teneur du carbon. *Revue de Metallurgie*. 1965. Vol. 62. № 4. Pp. 321-338.
 31. Снижение отходов стального слитка / С. П. Бакуменко и др. Київ : Наукова думка, 1967. 219 с.
 32. Werner M., Ergard T. Wirkung von elektrischer heizung leiter der schmiedeblocke auf seine innere struktur. *Stahl und Eisen*. 1955. № 26. Pp. 1765-1774.
 33. Setting of the steel ingot with the warm his head part by screens / Kitaev E. V., Skvortcov A. A., Sivkov V. L., Severyhin N. V. *Metals in USSR*. London, 1987. Vol. 2. Pp. 48-50.

References:

1. A.N. Smyrnov, V.M. Safonov, and A.Yu. Tsuprun, *Krupnii slytok: monohrafiya* [Large Ingot: Monograph]. Donetsk, Ukraine: Donetsk Publ., 2009. (Rus.)
2. O.M. Skrebtsov, *Zatverdinnia ta vlastyvoli lyvarnykh splaviv* [Hardening and power of liquid alloys]. Mariupol, Ukraine: PDTU Publ., 2003. (Ukr.)
3. V.T. Borysov, *Teoriya dvukhfaznoi zoni metallichesko slytka* [Theory of the two-phase zone of a metal ingot]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1987. (Rus.)
4. B.Ya. Liubov, *Teoriya krystallyzatsyy v bolshykh obiemakh* [Theory of crystallization in large volumes]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1975. (Rus.)
5. H.N. Elanskyi, *Stroenie y svoystva metallicheskykh rasplavov* [Structure and properties of metal melts]. Kyiv, Ukraine: KPI Publ., 1991. (Rus.)
6. V.V. Nazartyn et al., «Yzghotovlenye kuznechnikh slytkov bez osevykh usadochnykh defektov. Chast II» [«Production of forging ingots without axial shrinkage defects. Part II»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 2, pp. 44-48, 2012. (Rus.)
7. V.P. Bahmutov, S.Y. Zhulev, and Y.N. Zakharov, «Matematicheskoe modelirovaniye y eksperimentalnoye issledovaniye fizycheskoi neodnorodnosti y napryazhennoho sostoiyaniya krupnykh stalnykh slytkov» [«Mathematical modeling and experimental study of physical heterogeneity and stress state of large steel ingots»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 4, pp. 14-19, 2006.
8. D. Ameling, H.B. Lungen, and H.-J. Wieland, «The steel industry in Germany within the framework of the European Union», *MPT International*, № 3, pp. 24-35, 2006.
9. «High-performance steelmaking shop at Tokyo Steel, Japan», *Da News*, Nb 150, pp. 1-2, 2007.
10. Yu.S. Karabasov, *Stal na rubezhe stoletiy* [Steel at the turn of the century]. Dnipropetrovsk, Ukraine: DNTU Publ., 2001. (Rus.)
11. B.A. Baum, H.A. Khasyn, and H.V. Tiahunov, *Zhydkaya stal* [Liquid steel]. Donetsk, Ukraine: DPI Publ., 1984. (Rus.)
12. T. Mori, and K. Narita, «A study of the solidification of heavy carbon steel ingot», *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 12, № 2, pp. 83-91, 1972. doi: 10.2355/isijinternational1966.12.83.
13. J. Common, J. Delorme, and P. Bastien, «Heterogeneite des gros lingots de forge etude de influence des impuretes et des elements d'alliage sur la segregation», *Revue de Metallurgie*, vol. 70, № 4, pp. 37-44, 1973. doi: 10.1051/metal/197370040251. (Fr.)
14. O.M. Smirnov, and V. M. Safonov, *Vyrobnytstvo zlyvkiv stali ta promyslovykh splaviv: navchalnyi*

- posibnyk [Virogenesis of high-grade steels and industrial alloys: a basic guide]. Donetsk, Ukraine: Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013. (Ukr.)
15. M.C. Flemigs, «Solidification processing», *Metallurgical transactions*, vol. 5, № 10, pp. 2121-2134, 1974. doi: 10.1007/BF02643923.
 16. A. Ono, *Zatverdevanye metallov* [Hardening of metals]. Kyiv, Ukraine: IPL AN URSS Publ., 1980. (Rus.)
 17. Y.K. Marchenko, and M.Ya. Brovman, *Proyzvodstvo krupnikh stalnikh slytkov* [Production of large steel ingots]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1980. (Rus.)
 18. Ya.Y. Frenkel, *Vvedeniye v teoriyu metallov* [Introduction to the Theory of Metals]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1972. (Rus.)
 19. A.A. Podhorodetskiy, V.A. Aksenenko, and O.A. Sydorenko, «Prymeneniye efektyvnykh ekzotermicheskikh smesey pry razlyvke spokoinoi staly na krupnie lystovie slytky» [«Application of effective exothermic mixtures in casting of calm steel into large sheet ingots»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 3, pp. 59-60, 1989. (Rus.)
 20. V.E. Kliucharev, V.S. Dub, and Yu.V. Sobolev, «Nekotorye ytohy yssledovaniy, svyazannikh s osvoeniem proyzvodstva krupnikh y sverkhkrupnikh slytkov» [«Some results of research related to the development of production of large and super-large ingots»], *Protsessi razlyvki staly y kachestvo slytka – Steel casting processes and ingot quality*, pp. 12-16, 1989. (Rus.)
 21. V.N. Baranova, Yu.A. Skok, V.A. Efymov, and H.A. Lubenets, «Yssledovaniye strukturi kuznechnoho slytka massoi 142 t» [«Study of the structure of a forging ingot weighing 142 tons»], *Protsessi lytia – Casting processes*, № 2, pp. 28-38, 1995. (Rus.)
 22. M.Y. Kolosov, A.Y. Strohanov, and Yu.D. Smyrnov, *Kachestvo slytka spokoinoi staly* [Quality of the ingot of calm steel]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1973. (Rus.)
 23. A.R. Ubbelode, *Rasplavlennoe sostoyaniye veshchestva* [Molten state of matter]. Kharkiv, Ukraine: KhPI Publ., 1982. (Rus.)
 24. V.A. Efymov, and A.S. Eldarkhanov, «Peryodycheskaia krystallyzatsiya staly» [«Periodic crystallization of steel»], *Protsessi lytia – Casting processes*, № 1, pp. 52-61, 1995. (Rus.)
 25. Yu.V. Latash, and V.N. Matiakh, *Sovremennye sposobi proyzvodstva slytkov osobo vysokoho kachestva* [Modern methods of producing ingots of particularly high quality]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1987. (Rus.)
 26. S.Y. Zhulev, Yu.V. Kriakovskiy, V.A. Osnovyn, and H.N. Speranskaia, «Vliyaniye tekhnologicheskikh faktorov razlyvki na defektnost osevikh obiemov krupnikh kuznechnikh slytkov» [«The influence of technological factors of casting on the defectiveness of axial volumes of large forging ingots»], in Proc. 8 Sci.-Techn. Conf. «Improving steel casting processes», pp. 67-70. (Rus.)
 27. H.N. Elanskiy, *Razlyvka y krystallyzatsiya staly: ucheb. posoby* [Pouring and crystallization of steel: a tutorial]. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. 192 с. (Rus.)
 28. A.M. Samaryn, Ed. *Slytok y svoystva staly: trudi 5 konferentsyy po fizyko-khymicheskym osnovam proyzvodstva staly* [Ingot and properties of steel: Proceedings of the 5th conference on physical and chemical principles of steel production]. Kyiv, Ukraine: AN URSS Publ., 1961. (Rus.)
 29. M.C. Flemings, «Principles of Controls of Soundness and Homogeneity of Large Ingots», *Scandinavian Journal of Metallurgy*, № 5, pp. 1-15, 1976.
 30. A. Kohn, G. Morillon, «L'étude mathématique de la solidification des lingots de poids de 12 tons en las et moyenne teneur du carbone», *Revue de Metallurgie*, vol. 62, № 4, pp. 321-338, 1965. (Fr.)
 31. S.P. Bakumenko et al., *Snyzheniye otkhodov stalnoho slytka* [Reducing steel ingot waste]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1967. (Rus.)
 32. M. Werner, and T. Ergard, «Wirkung von elektrischer heizung leiter der schmiedeblocke auf seine innere struktur», *Stahl und Eisen*, № 26, pp. 1765-1774, 1955. (Ger.)
 33. E.V. Kitaev, A.A. Skvortsov, V.L. Sivkov, and N.V. Severyhin, «Setting of the steel ingot with the warm his head part by screens», *Metals in USSR*, vol. 2, pp. 48-50, 1987.

Стаття надійшла 20.10.2024

Стаття прийнята 15.11.2024

**АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ МОДИФІКАЦІЇ
НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ СТАЛІ
КАЛЬЦІЄМ**

У цьому дослідженні показано, що сталі, які були розкислені алюмінієм та містять у своєму складі розчинену сірку, під час обробки кальцієм утворюють твердий сульфід кальцію, при цьому CaO буде присутній у вигляді алюмінатів кальцію, з відповідною зміною складу в залежності від температури. З'ясовано, що для кожної стадії реакцій перетворення алюмінатів кальцію рівноважні концентрації продуктів реакції будуть мати сталі значення за умови сталості коефіцієнтів активності сірки та алюмінію відповідно. В дослідженні наведено зміну рівноважних продуктів реакції в результаті перебігу хімічного процесу та встановлено, що на останніх стадіях процесу підвищується активність CaO та знижується активність Al_2O_3 . В процесі досліджень було встановлено кінетичну модель перебігу гетерогенного процесу модифікування розплаву сталі кальцієм. У наших дослідженнях встановлено, що механізм розчинення кальцію у рідкій сталі проходить крізь утворення проміжної сполуки. Визначено оптимальну концентрацію кальцію у межах 1 ppm, що буде інгібітором процесу утворення $CaS-Al_2O_3$. Показано, що лімітуючою стадією процесу буде транспортування Al та S від включень у об'єм рідкої сталі. В роботі показано, що для підтвердження аналітичного аналізу та перевірки стадії, що лімітує процес, а саме реакція $CaS-Al_2O_3$, за рахунок розчиненого Ca у якості проміжної сполуки, полягає у розрахунку швидкості перетворення включень. Наведено, що концентрації розчинених алюмінію та сірки, що перебувають у рівновазі з включеннями, дуже малі, а загальний час, що необхідний для модифікації включень, у багато разів перевищував рівноважні концентрації. Для врахування цих умов нами було створено кінетичну модель для оцінки часу, що дозволила визначити стадію, що лімітує швидкість загального процесу модифікування включень. Для визначення і розрахунків рівноважних умов співіснування двох фаз у наших дослідженнях було використано термодинамічний пакет програм FactSage 8.3. З використанням термодинамічних розрахунків встановлено час, необхідний для перетворення включень глинозему у основні рідкі оксидні включення. В дослідженнях показано, що реакція модифікації включень напряму залежить від ступеня витрати твердого CaS. Для кожної стадії реакції перетворення включень швидкість має сталі значення, що підтверджується сталою швидкістю видалення CaS. В результаті проведених досліджень та термодинамічних розрахунків встановлено, що гетерогенний процес модифікації включень перебігає у дифузійній області і контролюється масопереносом. Час модифікації лінійно зростає зі зростанням вмісту кисню та зменшується зі зростанням вмісту кальцію у розплаві сталі. Доведено, що на заключній стадії модифікації включень необхідно в шість разів більше часу, ніж на ранніх стадіях процесу модифікування.

Ключові слова: модифікація, неметалеві включення, термодинамічні розрахунки, гетерогенний процес, рівноважний стан, дифузія.

¹ канд. тех. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-2372-8398, yefimovavq@gmail.com

² канд. хім. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9434-7747, ganna.yusina@mipolytech.education

³ канд. екон. наук, доцент, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, ORCID: 0009-0009-0479-5828, stalevoz@i.ua

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: 0000-0003-1454-2882, pilipenkotm@gmail.com

V.G. Yefimova, A.L. Yusina, Yu.O. Smirnov, T.M. Pylypenko. Analytical acknowledgment of the kinetics of modifications of non-metal inclusions in the process of treatment of steel with calcium. This study shows that steels that have been deoxidized with aluminum and place in their warehouse the dissolved sulfur, during the treatment with calcium, create solid calcium sulfide, in which CaO will be present in It looks like calcium aluminates, with a consistent change in storage depending on temperature. It is clear that for the skin stage of the reaction of the transformation of calcium aluminates, equal concentrations of the reaction products will become important for the stability of the coefficients of activity of the sulfur and aluminum It's obvious. In the subsequent study, a change in the equally important reaction products was carried out as a result of the interruption of the chemical process, and it was established that at the remaining stages of the process the activity of CaO increases and the activity of Al₂O₃ decreases. During the investigation, a kinetic model of the heterogeneous process of modifying the steel melt with calcium was established. Our research has established that the mechanism of calcium breakdown in rare cases begins to occur through the strengthening of the perineum. The optimal calcium concentration was determined to be 1 ppm, which would act as an inhibitor of the process of CaS-Al₂O₃ formation. It is shown that the limiting stage of the process will be the transport of Al and S to include rare steel. The work shows that to confirm the analytical analysis and verify the stage that the process is limited, and the CaS-Al₂O₃ reaction itself, for the breakdown of the dissolved Ca at the perineum, lies in the fluidity breakdown Turn it on. It has been found that the concentrations of aluminum degraders and sulphurs that occur in equal amounts of the inclusions are even small, and the initial hour that is necessary for the modification to be included, many times exceeds equal concentrations ii. To enlighten these minds, we created a kinetic model for estimating time, which allowed us to identify the stage that limits the fluidity of the initial modification process. For the identification and development of equal minds of the development of two phases, our research used the thermodynamic software package FactSage 8.3. It has been established that the hour required for the transformation of alumina at the main rare oxide inclusions lies within the limits of the established minds and becomes 2000τ. The research shows that the modification reaction is directly dependent on the degree of loss of solid CaS. For the cutaneous stage of the reaction of the transformation, the liquidity reaches a value that is confirmed by the increased liquidity of the CaS sample. As a result of the investigation of thermodynamic changes, it was established that the heterogeneous modification process occurs in the diffusion region and is controlled by mass transfer. The modification time increases linearly with the growth of acid and changes with the growth of calcium in the melting steel. It has been established that at the final stage of modification it is necessary to turn on six times more than an hour less in the early stages of the modification process.

Keywords: *modification, non-metallic inclusions, thermodynamic calculations, heterogeneous process, equilibrium state, diffusion.*

Постановка проблеми. Відомо, що обробка кальцієм часто застосовується при виробництві сталей, що розкислені алюмінієм. Кальцій вводиться у рідку сталь для перетворення включень глинозема у рідкі чи частково рідкі алюмінати кальцію. Застосування цього методу дозволяє уникнути заростання сталерозливного стакану під час безперервного розливання. Цей метод є дуже ефективним та поширеним в процесі модифікації включень, а саме їх переведення у рідкий стан. При цьому на сьогоднішній день недостатньо вивчена кінетика процесу модифікування, а саме невідомо, яка стадія визначає швидкість загального процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що тверді включення великих розмірів Al₂O₃ впливають на вихід та експлуатаційні характеристики сталі. Отже для модифікації цих включень використовують кальцій, який покращує експлуатаційні характеристики готової продукції [1]. При цьому твердий глинозем перетворюється у алюмінати кальцію, які у розплаві сталі перебувають у рідкому стані [1, 2].

Вивченню кінетики модифікування включень у розплаві сталі присвячено багато досліджень [1-4].

Так у роботах [3-6] було досліджено кінетику модифікації з метою встановлення точної кількості додавання кальцію та механізму модифікації. Авторами цих робіт було встановлено кінетичну модель для оксидів та сульфідів в процесі обробки кальцієм. Ця модель була основана на тому, що швидкість внутрішньої дифузії включень дуже висока, а відповідно, це свідчить про перебіг процесу в кінетичній області.

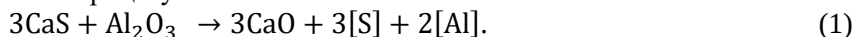
В роботах [7, 8] було встановлено, що процес утворення рідких включень в процесі модифікації Al_2O_3 є реакцією першого порядку.

Дослідження [9, 10] свідчать, що модифікація включень, які були оброблені кальцієм, покращується за рахунок скорочення часу реакції після обробки. В цих дослідженнях встановлено, що стадія, яка визначає швидкість загального процесу, є хімічною реакцією між глиноземом та рідким алюмінатом кальцію.

В роботі [11] показано, що кінетична модель модифікації включень, враховує відновлення кальцію у шлаковій фазі, швидкість розчинення кальцію у сталі, масоперенос у прикордонному шарі та дифузії розчиненої речовини у шарі продукту.

Отже, як впливає з огляду літературних джерел, кінетична модель модифікації неметалевих включень носить суперечливий характер і потребує додаткових досліджень, а саме, встановлення області перебігу процесу модифікування та його часу.

Дослідження останніх років підтвердили, що для сталей, що розкислені алюмінієм, які містять більш 10 ppm за масою розчиненої сірки, основним продуктом, що утворюється першим під час обробки кальцієм, є твердий сульфід кальцію. За даними роботи [3] зазвичай CaS зароджується на включеннях глинозема. При цьому утворюються включення алюмінатів кальцію у відповідності рівнянню хімічного процесу:



Виходячи з рівняння хімічної реакції, твердий CaS реагує з твердим Al_2O_3 з утворенням CaO . При цьому CaO присутній у вигляді різних алюмінатів кальцію. За температури $1550^\circ C$ послідовність продуктів реакції алюмінату кальцію в ході реакції (1) буде $CaO \cdot 6Al_2O_3$ (CA_6), потім $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA_2), $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA) і, нарешті, рідкий $CaO-Al_2O_3$.

З рівняння хімічного процесу (1) випливає, що для кожної стадії реакції рівноважні продукти $[\%S]^3[\%Al]^2$ будуть мати сталі значення (за умови, що коефіцієнтів активності розчинених S та Al мають сталі значення).

В ході перебігу хімічного процесу та врівноваження різних оксидних фаз (з різною активністю CaO та Al_2O_3) рівноважний продукт $[\%S]^3[\%Al]^2$ змінюється (на останніх стадіях процесу його стає менше, включаючи підвищену активність CaO та знижену активність Al_2O_3).

У роботі [2] показано, що відбір зразків рідкої сталі (як лабораторних розплавів, так і промислових плавок) показав, що CaS , який не прореагував, зазвичай зберігається у рідкій сталі декілька хвилин, що може призвести до заростання сталерозливного стакану.

Отже, визначення кінетичної моделі перебігу гетерогенної хімічної реакції (1) є актуальною задачею.

Мета статті – з використанням термодинамічних розрахунків процесу модифікування неметалевих включень кальцієм, встановити стадію, що лімітує швидкість перебігу гетерогенного процесу, а також середній час модифікування включень.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що реакція (1) відбувається між двома твердими фазами. У наших дослідженнях ми припустили, що механізм розчинення кальцію у рідкій сталі буде відбуватися з утворенням проміжної сполуки. Концентрація кальцію, що розчинився, буде становити до 1 ppm, що буде обмежувати швидкість реакції $CaS-Al_2O_3$.

Іншим потенційно визначальним фактором швидкості процесу буде транспортування Al та S (що утворюються в реакції (1)) від включень у об'єм рідкої сталі.

Одним із способів аналітичного аналізу та перевірки стадії, що лімітує процес, а саме реакція $CaS-Al_2O_3$, за рахунок розчиненого Ca у якості проміжної сполуки, полягає у розрахунку швидкості перетворення включень, якщо транспортування Al та S буде визначати швидкість реакції.

У відповідності до кінетики перебігу гетерогенних процесів передбачається, що біля поверхні твердої фази утворюється нерухомий мономолекулярний шар, в якому відбувається

хімічна реакція і встановлюються умови динамічної рівноваги. Продукти цієї реакції за рахунок дифузії переміщуються у глибину розплаву сталі, де також з часом встановлюється рівновага.

Передбачалося, що включення перед реакцією були сумішшю CaS і Al_2O_3 , змінюючи свій склад під час реакції. Включення мали розмір 0,5-4 мкм. Для включень такого розміру масообмін між об'ємом сталі і включенням відбувається за рахунок дифузії в фактично стаціонарних умовах, для яких число Шервуда дорівнює 2 (мається на увазі, що включення мають сферичну форму). Отже, коефіцієнт масопередачі у $\text{г/м}^2\cdot\text{с}$, між розплавом сталі та включенням буде визначатися як:

$$m = \frac{D}{r}, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт дифузії частинок Al та S у рідкій сталі, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радіус включень, м .

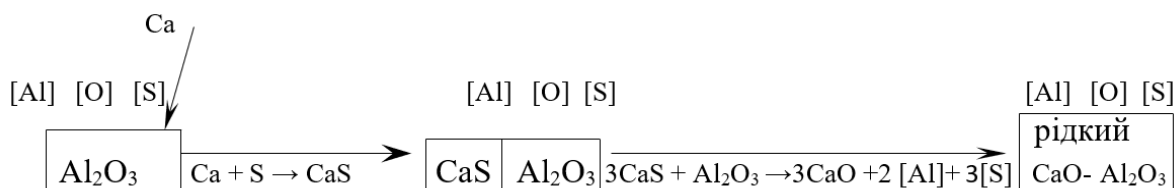


Рис. 1 – Схема етапів реакції при обробці кальцієм сталі, що містить сірку та розкислена алюмінієм. У якості проміжної сполуки утворюється твердий сульфід кальцію, а потім відбувається реакція з утворенням модифікованих включень CaS з Al_2O_3

У наших дослідженнях ми вважали, що реакція (1) обмежена масопереносом у сталі. Кількісно масоперенос визначався шляхом транспортування кінцевого об'єму сталі до кожного включення в одиницю часу. Цей об'єм сталі досягав рівноваги з включенням, потім змішувався з основною масою сталі і процес повторювався. Оскільки вважалось, що реакція (1) досягає стану рівноваги між включенням і об'ємом сталі, що реагує, вважалось, що реакція «тверде – тверде» (опосередкована розчиненням кальцієм) не є лімітуючою стадією процесу.

Для кожної зміни часу Δt , маса сталі ΔM у кг , яка вступає в реакцію з одиничним включенням, буде визначатися як:

$$\Delta M = 4\pi\rho_{\text{сталі}}rD\Delta t, \quad (3)$$

де $\rho_{\text{сталі}}$ – густина рідкої сталі кг/м^3 ; r – радіус включення, м .

Якщо загальна маса включень у даному об'ємі сталі визначається як $M_{\text{включень}}$, то загальна кількість включень $n_{\text{включень}}$ буде визначатись, як:

$$n_{\text{включень}} = \frac{M_{\text{включень}}}{4/3\pi r^3 \rho_{\text{включень}}}, \quad (4)$$

де $\rho_{\text{включень}}$ – густина включень, кг/м^3 .

Тоді маса сталі, що реагує відносно маси включень, буде визначатися за формулою:

$$\frac{\Delta M_{\text{сталі}}}{n_{\text{включень}}} = \frac{3\left(\frac{\rho_{\text{сталі}}}{\rho_{\text{включень}}}\right)D\Delta t}{r^2}. \quad (5)$$

У нашому дослідженні вважається, що всі включення мають наближено однаковий розмір та склад і реагують паралельно. З рівняння (5) випливає, що час за який в масі сталі утворилися включення, буде визначатись як:

$$\tau = \frac{r^2 \rho_{\text{включень}}}{3D\rho_{\text{сталі}}}. \quad (6)$$

Чисельне значення цього часу невелике. Для типового значення радіусу включень 1 мкм, $D = 9 \times 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\rho_{\text{включень}} = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{сталі}} = 7000 \text{ кг/м}^3$, $\tau = 13 \text{ мс}$.

Оскільки концентрації розчинених Al і S , що перебувають у рівновазі з включенням, дуже малі, загальний час, що необхідний для завершення модифікації включень, буде в багато разів перевищувати характеристику часу. Тому нами було використано кінетичну модель для оцінки часу, що визначає лімітуючу стадію гетерогенного процесу модифікування включень.

Далі в наших дослідженнях було використано термодинамічний пакет програм FactSage 8.3, що має можливість використання макросу для виконання розрахунків рівноваги,

що повторюються. Використання цього макросу дозволяє моделювати реакцію масопереносу, що контролюється дифузією, оскільки керування масопереносом має на увазі локальну рівновагу в об'ємі реакції. Це означає, що можна моделювати доволі складні процеси.

Базову структуру макросу, що було використано у наших дослідженнях, наведено на рис. 2. Макророзрахунки включають в себе врівноваження невеликої маси сталі, рівняння (3), що повторюється з кожним включенням, кожний раз з послідовним змішуванням сталі, що прореагувала з основним об'ємом сталі, що не прореагувала.

Реакція А

Рівновага розплаву сталюї ванни
без включень



Рис. 2 – Діаграма потоку, яка ілюструє принцип кінетичної моделі для локальної рівноваги з включеннями та обмеженого масопереносу між розплавом сталі зі включеннями та основним розплавом сталі. Реакції А та В відбуваються один раз для початкових умов, а реакції 1 та 2 відбуваються багатократно на кожному інтервалі часу

У термодинамічному пакеті програм FactSage для рідкої сталі було використано базу даних «FTmisc», а для рідкого шлаку – «FToxid» [2]. При цьому також розглядалися тверді речовини CaS, Al₂O₃, Ca₆, Ca₂, Ca і C₃A₂ у якості можливих продуктів реакції. Умови проведених розрахунків наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Припущені умови для модельних розрахунків.

Умови	Значення
Температура	1550 °C
Тиск	1 атм
Густина включень, кг/м ³	2500
Густина рідкої сталі, кг/м ³	7000
Початковий склад включень	CaS та Al ₂ O ₃ , у співвідношенні 0,7:1
Початкова концентрація включень в сталі	20 ppm

Результати розрахунків, з використанням умов, що наведені у Таблиці 1, наведені на рис. 3. Час було визначено у відповідності з рівнянням (6).

Послідовність переходу фаз оксидних включень довів саме ту послідовність, яку ми очікували, а саме: Al₂O₃ → Ca₆ → Ca₂ → Ca → рідина. Включення глинозема модифікуються у відповідності з реакцією CaS.

Час, необхідний для перетворення включень глинозема у основні рідкі оксидні включення, залежить від припущених умов, але зазвичай складає 2000т. У загальному випадку цей час становить наближено 26 мс для включень з типовим радіусом 1 мкм. При цьому мається на увазі, що реакція з Al₂O₃ не обмежується масопереносом Al та S у рідкій сталі (оскільки реакція триває декілька хвилин). Цей висновок знаходить своє підтвердження з запропонованою роллю масопереносу розчиненого кальцію між CaS та оксидними включеннями.

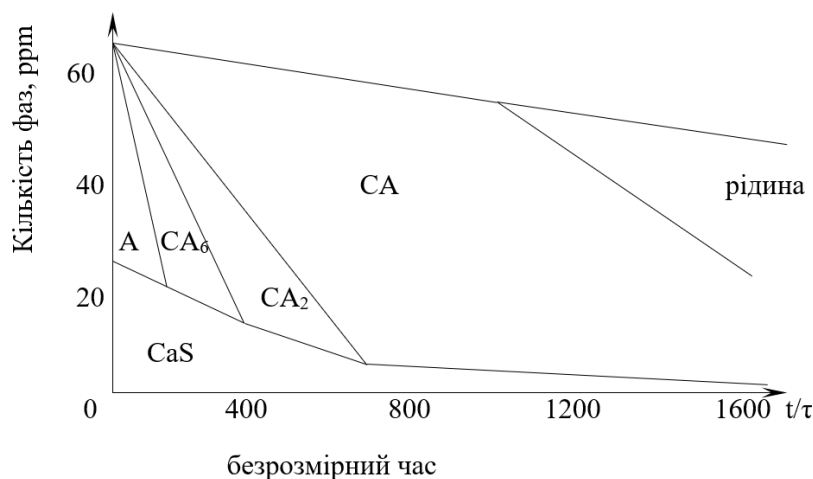


Рис. 3 – Розрахункова зміна кількості фаз включень для реакції, що контролюється масопереносом в об'ємі сталі з включеннями, що початково склалися з Al_2O_3 та CaS

Результати розрахунків наведено на рис. 3. У відповідності реакції (1) реакція модифікації включень напряму залежить від ступеня витрати твердого CaS . Для кожної стадії реакції перетворення включень швидкість має сталі значення, що підтверджується сталою швидкістю видалення CaS . З рисунка 3 випливає, що маса CaS лінійно зменшується на кожному етапі реакції (кожний окремий крок визначається фазами, що присутні у рівновазі Al_2O_3 - CA_6 - CaS – перший крок, за яким слідує CA_6 - CA_2 - CaS і т.п.).

Отже, проведені розрахунки свідчать, що швидкість реакції є сталою для кожного окремого кроку, оскільки модифікація контролюється швидкістю переносу розчиненого Al та S і фазами включень. Концентрації Al та S у локальній рівновазі з частково зміненими включеннями залишається сталою, в той час як оксидні фази врівноважуються з CaS та розчиненими Al та S .

Тобто одна пара рівноважних концентрацій Al та S у сталі у контакт з Al_2O_3 , CA_6 та CaS за температури 1550°C становить $0,16\%$ Al та $0,28\%$ S , що значно перевищує їх об'ємну концентрацію. Оскільки концентрації Al та S у реакційному об'ємі навколо включень набагато вищі, ніж об'ємні концентрації, що змінюються повільно, існує стала різниця концентрацій Al та S між реакційним об'ємом та об'ємним розплавом сталі. Отже, з цих даних можна зробити висновок, що процес відбувається в дифузійній області і контролюється масопереносом, оскільки швидкість хімічної реакції значно більша.

Висновки

З використанням програмного забезпечення FactSage 8.3 було вивчено кінетику модифікування та морфологію зміни включень в процесі модифікування рідкої сталі кальцієм. В результаті проведених досліджень було встановлено, що гетерогенний процес модифікації включень перебігає у дифузійній області і контролюється масопереносом, а час модифікації включень у середньому становить 26 мс.

Перелік використаних джерел:

1. Xi Z., Li C., Wang L. A kinetic model for the modification of Al_2O_3 inclusions during calcium treatment in high-carbon hard wire steel. *Materials*. 2021. Vol. 14(5), Pp. 2-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051305>.
2. Li X. D., Deng S., Yang Y. B. Production practice of plasticity control of inclusions in $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system of SWRH82B hard wire steel. *Metall. China*. 2018. Vol. 28. Pp. 61-66.
3. Behaviour of Sulphide and Non-alumina-Based Oxide Inclusions in Ca-Treated High-Carbon Steel / Y. Tanaka et al. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2020. Vol. 51. Pp. 1384-1394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01872-2>.

4. Handoko W., Anurag A., Pahlevani F. Effect of selective-precipitations process on the corrosion resistance and hardness of dual-phase high-carbon steel. *Scientific reports*. 2019. Vol. 9. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52228-z>.
5. Wang G. D., Lv Y. W. Research on inclusion control and rolling process optimization of 82B hard wire steel. *Metall. China*. 2012. Vol. 22. Pp. 15-17.
6. Finite element simulation of cold rolling of thin strip / Z. Jiang et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 140. Pp. 542-547. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00832-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00832-X).
7. Abraham S., Bodnar R., Raines J. Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2018. Vol. 1. Pp. 1243-1257. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s42243-018-0017-3>.
8. Transient Inclusion Evolution During Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel: Part I. Background, Experimental Techniques and Analysis Methods / N. Verma et al. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2011. Vol. 42. Pp. 711-719. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-011-9517-2>.
9. Yang G. W., Wang X. H., Huang F. X. Influence of Calcium Addition on Inclusions in LCAK Steel with Ultralow Sulfur Content. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2015. Vol. 46. Pp. 145-154. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-014-0181-1>.
10. Zhang L., Liu Y., Zhang Y. Transient Evolution of Nonmetallic Inclusions During Calcium Treatment of Molten Steel. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2018. Vol. 49. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1289-5>.
11. Sa'nchez G., Hidalgo C., Donoso P. Kinetic studies of calcium-Induced calcium release in cardiac sarcoplasmic reticulum vesicles. *Biophysical Journal*. 2003. Vol. 84. Pp. 2319-2330. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(03\)75037-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(03)75037-1).

References:

1. Z. Xi, C. Li, and L. Wang, «A kinetic model for the modification of Al₂O₃ inclusions during calcium treatment in high-carbon hard wire steel», *Materials*, vol. 14(5), pp. 2-16, 2021. **doi: 10.3390/ma14051305**.
2. X.D. Li, S. Deng, and Y.B. Yang, «Production practice of plasticity control of inclusions in CaO–Al₂O₃–SiO₂ system of SWRH82B hard wire steel», *Metall.China*, vol. 28, pp. 61-66, 2018.
3. Y. Tanaka, F. Pahlevani, S.-Y. Kitamura, K. Privat, and V. Sahajwalla, «Behaviour of Sulphide and Non-alumina-Based Oxide Inclusions in Ca-Treated High-Carbon Steel», *Metallurgical and Materials Transaction A*, vol. 51, pp. 1384-1394, 2020. **doi: 10.1007/s11663-020-01872-2**.
4. W. Handoko, A. Anurag, and F. Pahlevani, «Effect of selective-precipitations process on the corrosion resistance and hardness of dual-phase high-carbon steel», *Scientific reports*, vol. 9, pp. 1-16, 2019. **doi: 10.1038/s41598-019-52228-z**.
5. G.D. Wang, and Y.W. Lv, «Research on inclusion control and rolling process optimization of 82B hard wire steel», *Metall. China*, vol. 22, pp. 15-17, 2012.
6. Z. Jiang, A. Tieu, X. Zhang, C. Lu, and W. Sun, «Finite element simulation of cold rolling of thin strip», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, pp. 542-547, 2003. **doi: 10.1016/S0924-0136(03)00832-X**.
7. S. Abraham, R. Bodnar, and J. Raines, «Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment», *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 1, pp. 1243-1257, 2018. **doi: 10.1007/s42243-018-0017-3**.
8. N. Verma, P.C. Pistorius, R.J. Fruehan, M. Potter, M. Lind, and S. Story, «Transient Inclusion Evolution During Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel: Part I. Background, Experimental Techniques and Analysis Methods», *Metallurgical and Materials Transaction B*, vol. 42, pp. 711-719, 2011. **doi: 10.1007/s11663-011-9517-2**.
9. G.W. Yang, X.H. Wang, and F.X. Huang, «Influence of Calcium Addition on Inclusions in LCAK Steel with Ultralow Sulfur Content», *Metallurgical and Materials Transaction B*, vol. 46, pp. 145-154, 2015. **doi: 10.1007/s11663-014-0181-1**.
10. L. Zhang, Y. Liu, and Y. Zhang, «Transient Evolution of Nonmetallic Inclusions During Calcium Treatment of Molten Steel», *Metallurgical and Materials Transaction B*, vol. 49, pp. 1-19, 2018. **doi: 10.1007/s11663-018-1289-5**.

11. G. Sa'nchez, C. Hidalgo, and P. Donoso, «Kinetic studies of calcium-Induced calcium release in cardiac sarcoplasmic reticulum vesicles», *Biophysical Journal*, vol. 84, pp. 2319-2330, 2003. doi: 10.1016/S0006-3495(03)75037-1.

Стаття надійшла 11.11.2024

Стаття прийнята 20.11.2024

УДК 669.141.245

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321265

© Вовк А.О.¹, Похвалітий А.А.²

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ФОРМУВАННЯ ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ ПРИ ВИПУСКУ ПЛАВКИ З КОНВЕРТЕРА

Дослідження умов формування газорідинного потоку при випуску плавки з конвертера базується на низькотемпературному моделюванні, спрямованому на аналіз впливу конструктивних характеристик сталевипускного каналу. Використання інертного газу (аргону) забезпечило створення захисної газової оболонки, що зменшує контакт металу з атмосферним киснем, знижуючи його вміст у потоці до 1-3%. На основі експериментів розроблено класифікацію режимів продувки та емпіричні залежності для опису взаємодії газу і рідини. Встановлено, що мінімальна концентрація кисню у газовій фазі (1-3%) досягається за витрати аргону 10-20% від максимальної. Це дозволяє підтримувати ефективність захисної оболонки на рівні 95%. Подальше збільшення витрати аргону призводить до розширення кута розкриття потоку, що негативно впливає на його організацію. Збільшення кількості продувних сопел підвищує стабільність потоку: при шести соплах концентрація кисню залишається нижчою за 10,5% навіть за високої витрати газу. Експерименти на плоскій моделі льотки виявили залежність між витратою газу, рівнем рідини та глибиною вирви. Підвищення витрати газу за умов високого рівня рідини сприяє стабільності міжфазної поверхні, тоді як зниження рівня рідини викликає збільшення глибини вирви та погіршення організації потоку. Експерименти виконувалися на лабораторному стенді, що відтворював процес випуску плавки з урахуванням геометричної та динамічної подібності. Використовувався технічно чистий аргон із вмістом кисню до 0,7%. Основними параметрами для аналізу стали витрата газу, рівень рідини, відносна глибина вирви та кут розкриття потоку. Для оцінки ефективності газової оболонки застосовувався аналіз концентрації кисню за допомогою газоаналізатора. Запропоновані оптимальні умови включають контроль витрати аргону, рівня рідини та кількості сопел. Встановлено, що витрата аргону 0,05-0,125 м³/хв забезпечує ефективний захист розплаву, а оптимальний кут розкриття потоку до 3° сприяє ефективності на рівні 92-99%. Отримані результати мають важливе практичне значення для вдосконалення процесу випуску плавки, покращення рафінування та зниження окислення сталі. Розроблені залежності дозволяють точніше визначати параметри продувки та оптимізувати конструкцію випускного каналу, підвищуючи ефективність металургійних процесів.

Ключові слова: конвертер, моделювання, випуск розплаву, газорідинний потік, аргон, захисна оболонка, глибина вирви.

¹ аспірантка, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0009-0007-7692-0232, alyonkamax.vovk@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-9652-767X, artemmslp@gmail.com

A.O. Vovk, A.A. Pokhvalityi. Study of the conditions of gas-liquid flow formation during the tapping of the melt from the converter. The study of the conditions for the formation of a gas-liquid flow during the tapping of molten metal from the converter is based on low-temperature modeling, aimed at analyzing the impact of the structural characteristics of the steel tapping channel. The use of inert gas (argon) enabled the creation of a protective gas shell that reduces the contact of the metal with atmospheric oxygen, lowering its content in the flow to 1–3%. Based on the experiments, a classification of blowing regimes and empirical dependencies were developed to describe the interaction between the gas and the liquid. It was established that the minimum oxygen concentration in the gas phase (1–3%) is achieved with an argon flow of 10–20% of the maximum. This maintains the efficiency of the protective shell at 95%. Further increases in the argon flow lead to the expansion of the flow's opening angle, negatively impacting its organization. Increasing the number of nozzles improves flow stability: with six nozzles, the oxygen concentration remains below 10.5%, even with high gas flow rates. Experiments on a flat tapping channel model revealed a dependence between the gas flow, liquid level, and the depth of the vortex. Increasing the gas flow with a high liquid level contributes to the stability of the interfacial surface, whereas reducing the liquid level leads to an increase in vortex depth and deterioration of the flow organization. The experiments were conducted on a laboratory setup simulating the tapping process, accounting for geometric and dynamic similarity. Technically pure argon with an oxygen content of up to 0.7% was used. The main parameters for analysis included gas flow rate, liquid level, relative vortex depth, and flow opening angle. To assess the effectiveness of the gas shell, oxygen concentration was analyzed using a gas analyzer. The proposed optimal conditions include controlling the argon flow rate, liquid level, and the number of nozzles. It was established that an argon flow rate of 0.05–0.125 m³/min ensures effective protection of the melt, and an optimal flow opening angle of up to 3° contributes to efficiency levels of 92–99%. The obtained results are of significant practical importance for improving the tapping process, refining, and reducing steel oxidation. The developed dependencies allow for more accurate determination of blowing parameters and optimization of the tapping channel design, thereby enhancing the efficiency of metallurgical processes.

Keywords: converter, modeling, molten metal tapping, gas-liquid flow, argon, protective shell, vortex depth.

Постановка проблеми. З розвитком позаагрегатних методів обробки сталі та зростанням вимог до її якості значно актуалізувалося питання вдосконалення функціональних можливостей випускного каналу конвертера. Сучасні дослідження спрямовані на забезпечення ефективного відсікання високоокисленого шлаку на початку та наприкінці випуску, захисту потоків металу від впливу атмосфери, а також реалізації додаткових процесів рафінування, розкислення й легування металу в процесі випуску [1]. У зв'язку з цим активно використовують потенційну енергію металу, що надходить у ківш із висоти 5-8 метрів, яка може бути ефективним джерелом для інтенсифікації процесів [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея застосування вуглецевого потенціалу розплаву для вуглецевого розкислення не нова. Аналіз технічної літератури показує, що для здійснення цього процесу за відсутності високоокисленого шлаку необхідна витрата аргону в межах 0,4-1,2 м³ на тонну сталі [4]. Однак досягнення подібних умов у конвертері є складним через низку технологічних обмежень. Одним із можливих шляхів на етапі позаагрегатної обробки є зниження в ковші активності шлаку шляхом ефективного видалення його залишків. Проте навіть за таких умов розкислення з використанням аргону із вказаною витратою створює значні труднощі: зростає тривалість процесу до 20-60 хвилин, що негативно впливає на показники продуктивності [5]. Крім того, велика кількість утвореного газу призводить до суттєвих ризиків, пов'язаних із викидом металу з ковша, що може спричинити аварійні ситуації [6]. Через це виникла ідея використати енергетичний потенціал сталевипускного каналу конвертера для здійснення розкислення залишковим вуглецем під час випуску розплаву. Це пропонується реалізувати шляхом обробки розплаву інертним газом у робочому просторі сталевипускного каналу (льотки) [7]. Одним з

головних питань, яке потрібно вирішити при реалізації вуглецевого розкислення розплаву є визначення умов формування високоорганізованого газометалевого потоку з мінімальним впливом атмосферного повітря на розплав. Слід зазначити, що існуючі способи захисту потоку розплаву від впливу навколишньої атмосфери з застосуванням пристроїв для утворення газової завіси [8] не відрізняються високою ефективністю.

Метою роботи є дослідження умов формування газорідного потоку при випуску плавки з конвертера, визначення оптимальних параметрів витрати аргону та конструктивних характеристик випускного каналу для створення ефективної захисної газової оболонки, що мінімізує контакт розплаву з атмосферним киснем та покращує організацію потоку.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження умов формування газорідного потоку проведено низькотемпературні експерименти на лабораторному стенді (рис. 1). Стенд відтворював умови, наближені до реальних, з урахуванням масштабування за критеріями подібності $We = idem$, $Ar = idem$, $Re = idem$ [9]. Діаметр (d) випускного каналу становить 50 мм. Детальний опис методики розрахунку, використаних критеріїв подібності та характеристик обладнання представлено в джерелах [10, 11].

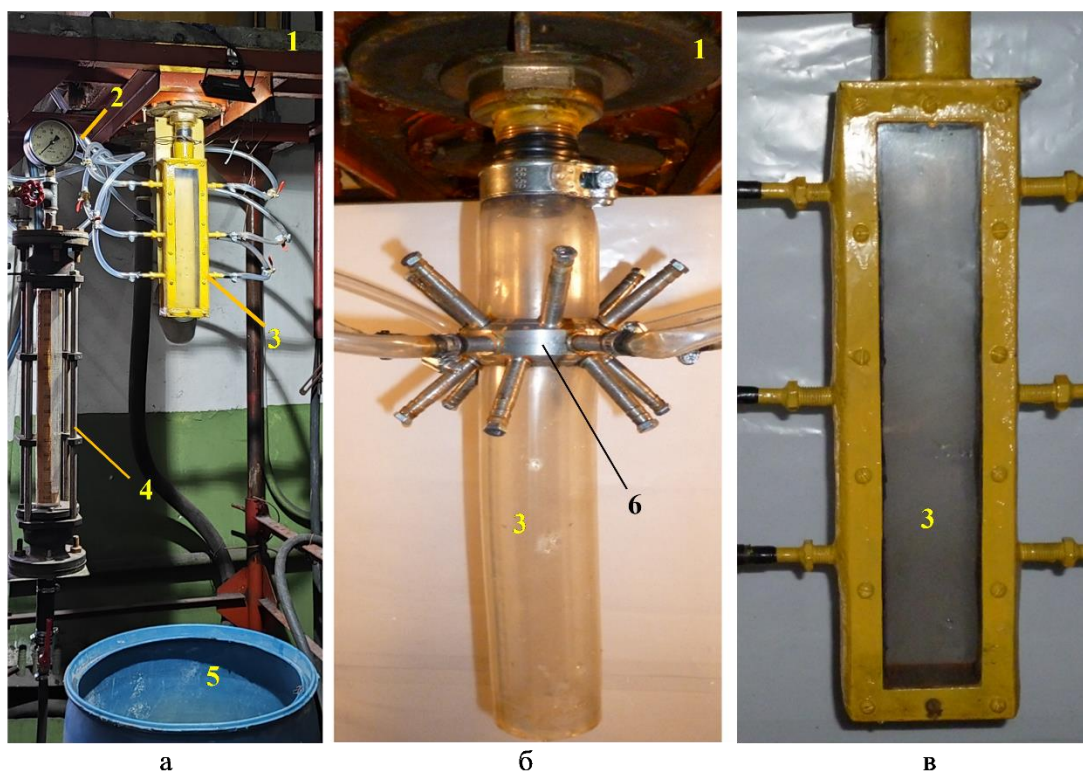


Рис. 1 – Лабораторна установка для низькотемпературного моделювання процесу випуску розплаву з конвертера (а), обладнана двокамерними циліндричною (б) і плоскою (в) моделями льотки (випускних каналів): 1 – ємність з рідиною; 2 – манометр; 3 – випускний канал; 4 – ротаметр; 5 – приймальний ківш; 6 – продувний блок

Для оцінки впливу ступеня організації газорідного потоку на формування газової оболонки, що захищає від впливу атмосфери, проведено серію експериментів з використанням аргону [12]. Ефективність захисту, що створюється газовою оболонкою, визначали за вмістом кисню в бульбашках газу, що спливають у ковш після попадання в нього потоку рідини, за допомогою газоаналізатора типу ОКЦИ-5М-Н2.

Технічно чистий аргон, застосований для продувки в робочому просторі сталевипускного каналу, мав вміст кисню в межах 0,5-0,7%. Діапазон витрати аргону в експерименті становив від 0 до 0,1 м³/хв на одне сопло, що відповідало 0-100% значення витрати. Ефективність захисної дії аргону оцінювали за допомогою наступної формули:

$$K_{Ar} = 100 - 4,762 \cdot (\{O_2\} - \{O_2\}_{Ar}), \quad (1)$$

де K_{Ar} – коефіцієнт захисної дії аргону, %;

$\{O_2\}$ і $\{O_2\}_{Ar}$ – вміст кисню у в захисній газовій оболонці і аргоні відповідно, %.

На основі результатів вимірювань та аналітичних розрахунків була побудована діаграма (рис. 2).

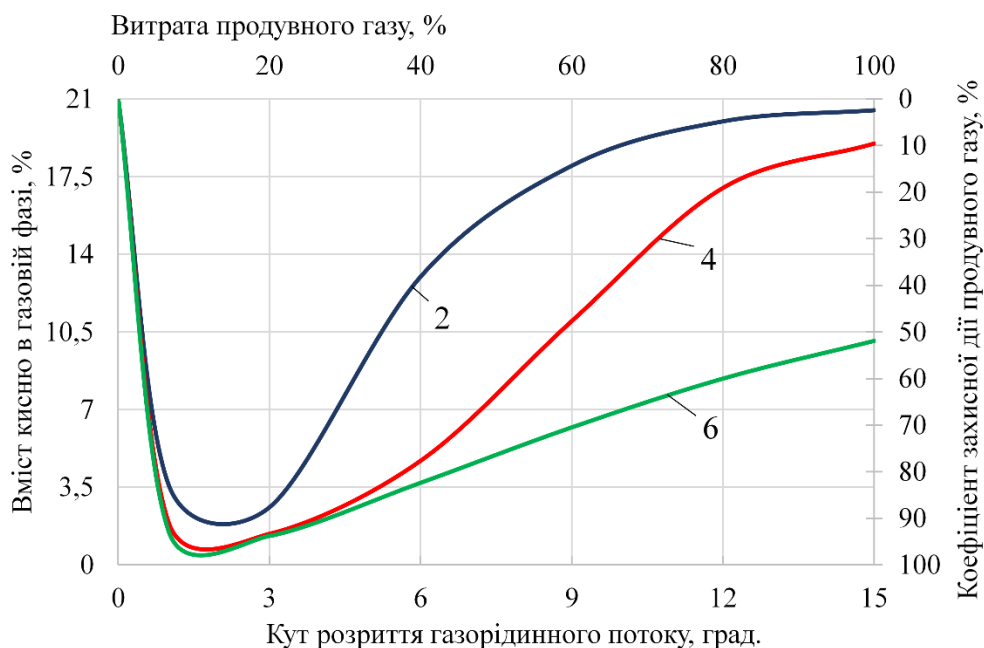


Рис. 2 – Залежність вмісту кисню в газорідному потоці від кута розкриття при різних витратах газу та кількості сопел: цифри поруч з кривими вказують на кількість сопел у продувному блоці

Аналіз отриманих результатів (рис. 2) показав, що за відсутності подачі газу вміст кисню в пробах становить 21%. Мінімальні концентрації кисню (1-3%) спостерігалися при витраті продувного газу на рівні 10-20% від максимального значення, що забезпечувало коефіцієнт захисної дії газу на рівні 90-95%. Подальше збільшення витрати газу призводило до розширення кута розкриття газорідного потоку (ГРП), що, в свою чергу, спричиняло підвищення вмісту кисню в газовій фазі та зниження ефективності захисної дії газу. Дослідження вказують, що збільшення кількості продувних сопел з двох до шести значно поліпшує організацію потоку в більш широкому діапазоні витрат газу. Так, при застосуванні шести сопел концентрація кисню залишалася нижчою за 10,5% навіть при максимальній витраті газу в дослідному діапазоні і куті розкриття потоку 15°. У разі використання двох сопел, при витраті газу на рівні 50% від максимального значення, кут розкриття ГРП становив 7-8°, а вміст кисню в газовій фазі досягав приблизно 17%. Подальше збільшення витрати газу повністю нівелювало захисну дію. З'ясовано, що збільшення кута розкриття потоку з 1° до 15° супроводжується зниженням ефективності захисної дії продувного газу з 90-95% до 0-50%, при цьому концентрація кисню в газовій фазі зростала з 1,2-1,5% до 10,3-20,5%. При кутах розкриття до 3° ефективність захисної дії аргону залишалася високою (92-99%) в межах дослідного діапазону витрат газу. Оптимізація витрати газу дозволяє підтримувати коефіцієнт захисної дії на рівні 80-90% при кутах розкриття потоку від 3° до 6° [12].

Результати дослідження дозволили визначити оптимальні параметри витрати аргону та ступеня організації потоку, які забезпечують максимальну ефективність захисної дії газової оболонки. Таким чином, для підвищення ефективності захисної дії продувного газу від впливу атмосферного кисню доцільно збільшувати кількість сопел у продувному блоці. Однак при обробці розплаву наприкінці випуску відбувається збільшення кута розкриття ГРП на 5-7°, що погіршує умови формування захисної газової оболонки.

З метою визначення показників, що впливають на формування газорідного потоку в межах випускного каналу, провели серію досліджень з використанням плоскої моделі льотки. Модель являє собою зріз циліндричної льотки з усіченими сегментами, паралельними співвісно розташованій парі продувних сопел (рис. 1в). В якості факторів, що впливають на показник глибини вирви, обрали витрату газу q та рівень рідини в конвертері H . Ширина плоскої льотки дорівнює діаметру циліндричної. Для узагальнення результатів прийняли відносну глибину вирви, що являє собою відношення глибини вирви до діаметру (ширини) випускного каналу $K_B = \Delta i / d$. Результати досліджень представлені в таблиці 1. Вигляд взаємодії газового і рідинного потоку представлені на рис. 3.

Таблиця 1

Результати дослідження взаємодії газового і рідинного потоку
в порожнині випускного каналу

№ з/п	Витрата газу на 1 сопло, q , м ³ /хв	Рівень рідини, H , м	Швидкість потоку, v , м/с	Глибина вирви, Δi , мм			Відносна глибина вирви, K_B
				min	max	med	
1	0,135	0,9	4,65	0	3	1,5	0,03
2	0,125	0,85	4,54	0	3	1,5	0,03
3	0,1	0,8	4,43	4	5	4,5	0,09
4	0,075	0,73	4,27	4	6	5	0,1
5	0,05	0,68	4,16	8	12	10	0,2
6	0,035	0,65	4,08	12	14	13	0,26
7	0,025	0,6	3,96	14	16	15	0,3
8	0,015	0,55	3,84	30	35	32,5	0,65
9	0,005	0,5	3,71	40	50	45	0,9
10	0,1	0,45	3,57	2	3	2,5	0,05
11	0,075	0,3	3,13	3	4	3,5	0,07
12	0,025	0,35	3,28	8	10	9	0,18
13	0,05	0,3	3,13	4	6	5	0,1
14	0,015	0,25	2,97	10	12	11	0,22

Проведені дослідження дозволяють проаналізувати вплив витрати газу та рівня рідини в конвертері на процеси формування газорідного потоку в межах випускного каналу. Представлені в таблиці результати свідчать, що відносна глибина вирви (K_B) має суттєві варіації залежно від параметрів витрат газу та рівня рідини.

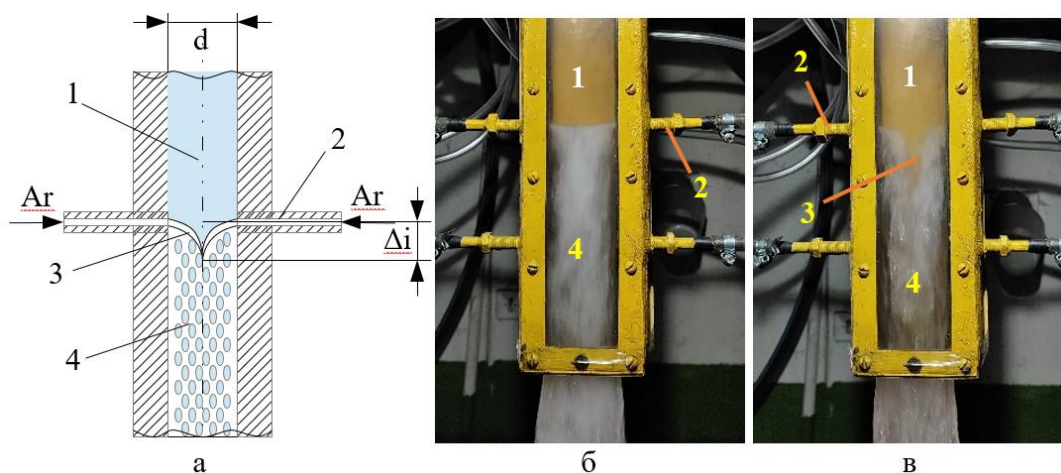


Рис. 3 – Схема (а) і вигляд взаємодії газового і рідинного потоку в порожнині випускного каналу при відносній глибині вирви $K_B=0,03$ (б) і $K_B=0,9$ (в): 1 – потік рідини; 2 – сопло; 3 – вирва; 4 – газорідний потік

При високих витратах газу ($q = 0,1-0,135 \text{ м}^3/\text{хв}$) вплив рівня рідини на відносну глибину вирви незначний і K_B залишається в межах $0,03-0,09$, що свідчить про помірну організацію міжфазної поверхні. У цьому діапазоні продувка є стабільною і сприяє формуванню потоку з достатньо розвинутою міжфазною поверхнею. Водночас, при зниженні витрат газу ($q = 0,015 = 0,05 \text{ м}^3/\text{хв}$) відносна глибина вирви істотно зростає ($K_B = 0,22-0,65$), що вказує на суттєвий вплив рівня рідини на формування газорідного потоку. У цих умовах потік стає менш організованим і можливе зниження ефективності процесу.

За результатами досліджень отримано емпіричну залежність, яка дозволяє моделювати взаємозв'язок між витратою газу, рівнем рідини та відносною глибиною вирви.

$$K_B = \frac{3,062 \cdot q^{-0,627} \cdot H^{0,857} - 65,75 \cdot q + 0,202}{d} \quad (2)$$

Графічний аналіз (рис. 4) показує, що при зменшенні витрати газу та рівня рідини відбувається значне збільшення відносної глибини вирви. Це свідчить про складність забезпечення стабільного процесу продувки в таких умовах.

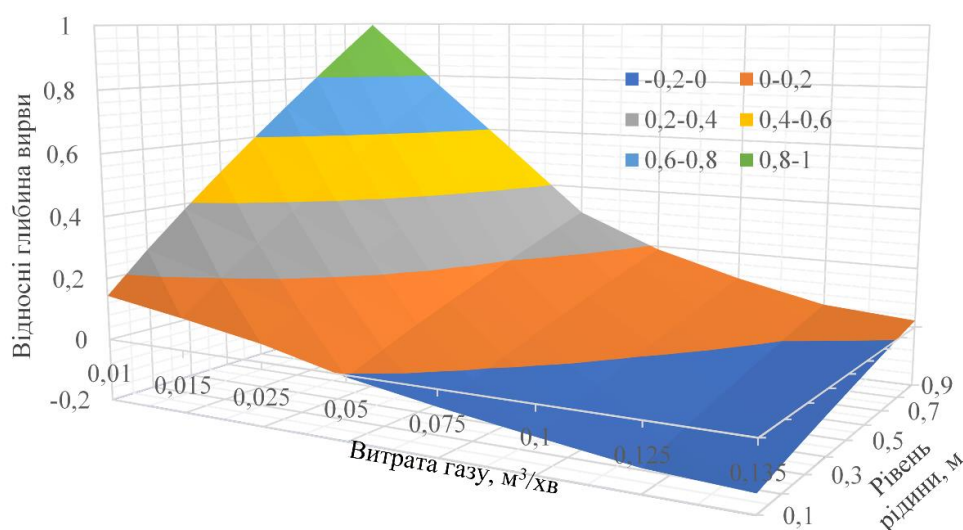


Рис. 4 – Вплив витрати газу на відносну глибину вирви при різних рівнях рідини в конвертері

Запропонована в роботі [12] класифікація режимів продувки потоку рідини в випускному каналі, де в якості показника застосовано кут нахилу газових струменів (γ), не враховує зміну рівня рідини в конвертері в процесі випуску плавки і вважається сталою, чого досить важко дотримуватись в виробничих умовах.

Аналіз отриманих даних (рис. 4) дозволив розробити класифікацію режимів продувки, яка враховує відносну глибину вирви (K_B) як ключовий параметр:

Режим I: при $K_B > 0,5$ інтенсивного перемішування газу з рідиною не відбувається.

Режим II: при $0,5 > K_B > 0$ збільшення витрати газу або зниження рівня рідини сприяє зменшенню глибини вирви, що сприяє інтенсивному перемішуванню газу з рідиною. У цьому режимі формується газорідний потік із розвинутою міжфазною поверхнею та високим ступенем організації.

Режим III: при $K_B < 0$ подальше збільшення витрати газу або зменшення рівня рідини спричиняє центральний пробій газу та перехід газорідного потоку до дисперсно-кільцевого режиму («режим пробою»). Цей режим характеризується збільшенням кута розкриття відкритої частини потоку.

Приведені режими продування ефективні для різних технологічних операцій. Так, для максимізації захисної дії продувочного газу доцільним є продування в режимі I. Продування в режимі II забезпечує найкращі умови для рафінувальних операцій завдяки інтенсивному перемішуванню та високому ступеню організації потоку. Режим III можна застосовувати для відпрацювання

технології газодинамічної відсічки шлаку. Отримані результати є основою для подальших досліджень і вдосконалення процесу випуску розплаву з конвертера в промислових умовах.

Висновки

Використання аргону з витратою 0,05-0,125 м³/хв на одне сопло забезпечує ефективне створення захисної газової оболонки для мінімізації вмісту кисню в газовій фазі. Збільшення кількості сопел значно покращує організацію газорідного потоку, зменшує ризик забруднення сталі та підвищує ефективність процесів рафінування. Оптимальний кут розкриття потоку становить до 3°, що забезпечує ефективність захисту аргonom на рівні 92-99%. При збільшенні кута понад 6° ефективність значно знижується.

Встановлена залежність між витратою газу, рівнем рідини та глибиною вирви дозволяє класифікувати режими продувки:

- режим I: захист від атмосферного впливу (відносна глибина вирви $K_B > 0,5$);
- режим II: висока організація потоку для процесів розкислення та рафінування ($0 < K_B \leq 0,5$);
- режим III: режим «пробою» для відпрацювання технології ефективного відсікання шлаку ($K_B < 0$).

Запропоновані експериментальні методики і результати можуть бути використані для оптимізації конструкції випускного каналу конвертера з урахуванням промислових умов.

Перелік використаних джерел:

1. Гичёв Ю. А., Перцевой В. А. Классификация и сравнение способов отсечки шлака при выпуске стали из конвертеров. *Новости науки Приднепровья*. Днепропетровск : НМетАУ, 2008. № 1-2. С. 94-98.
2. Пристрій для відділення металу і шлаку: пат. 36516 Україна: МПК: C21C 5/46. № u200807519; заявл. 02.06.2008; опубл. 27.10.2008, Бюл. №20.
3. Method for tapping molten metal: pat. 03-236414 Japan. № 02-031183; 09.02.1990.
4. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів та екологія: навчальний посібник. Дніпропетровськ : РВА «Дніпро – ВАЛ», 2006. 454 с.
5. Смірнов О. М., Сафонов В. М., Проскурено Д. В., Пісмарьов, К.Є. Особливості перемішування сталі і шлаку в ковші під час продувки аргonom. *Металознавство та обробка металів*. 2009. № 3. С. 25-31.
6. Охотский В. Б. Математическое моделирование удаления газов из стали при продувке в ковшах инертными газами. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 7. С. 24-28.
7. Совершенствование выпуска стали из конвертера / Кулик А. Д., Кашеев М. А., Похвалитый А. А., Сотниченко С. С. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 1. С. 18-20.
8. Method for preventing nitrogen absorption of cr-containing molten steel: pat. 2010-138446 Japan. № 2008-315479; 11.12.2008.
9. Еронько С. П., Быковских С. В. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали. Київ : Техника, 1998. 136 с.
10. Формування газометалевого потоку в умовах «хімічного» вакууму у сталевипускному каналі / А. А. Похвалитий та ін. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ, 2019. Вип. 1(34). С. 3-8. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.34.2019.1>.
11. Повышение эффективности технологии выпуска металла из конвертера. Модель взаимодействия струи с газом в полости летки. Сообщение 1 / А. П. Огурцов та ін. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. № 3(23). С. 21-26.
12. Дослідження захисної дії аргону в диспергованому потоці при випуску розплаву з конвертера / А. О. Вовк та ін. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід* : зб. матеріалів VI Міжн. конф., м. Дніпро, 16-18 січня 2024 р. Дніпро : Журфонд, 2024, с. 105-109.

References:

1. Yu.A. Gichev, and V.A. Pertsevov, «Klassifikatsiya i sravneniye sposobov otsechki shlaka pri vypuske stali iz konverterov» [«Classification and comparison of slag cutoff methods during steel tapping from converters»], *Novosti nauki Pridneprov'ya – Dnieper science news*, № 1-2, pp. 94-98, 2008. (Rus.)
2. Yu.O. Hichov, S.V. Bychkov, O.O. Malyk, Yu.I. Zhavoronkov, and V.O. Pertsevyi, «Prystriy dlya viddilennya metalu i shlaku» [«Device for separating metal and slag»], *UA patent 36516 Appl. u200807519*, October 27, 2008. (Ukr.)
3. Sumita Morihiro, «Method for tapping molten metal», *JPN patent 03-236414 Appl. № 02-031183*, 09.02.1990.
4. B.M. Boichenko, V.B. Okhotsky, and P.S. Kharlashin, *Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriya, tekhnolohiya, yakist' stali, konstruktsiya ahrehativ, retsyrkulyatsiya materialiv ta ekolohiya: navchal'nyy posibnyk* [Converter steelmaking: theory, technology, steel quality, equipment design, material recycling, and ecology: study guide]. Dnipropetrovsk, Ukraine: RVA «Dnipro – VAL» Publ., 2006. (Ukr.)
5. O.M. Smirnov, V.M. Safonov, D.V. Proskurenko, and K.Ye. Pismaryov, «Osoblyvosti peremishuvannya stali i shlaku v kovshi pid chas produvky arhonom» [«Features of mixing steel and slag in a ladle during argon blowing»], *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metal science and metal processing*, № 3, pp. 25-31, 2009. (Ukr.)
6. V.B. Okhotsky, «Matematicheskoye modelirovaniye udaleniya gazov iz stali pri produvke v kovshakh inertnyimi gazami» [«Mathematical modeling of gas removal from steel during inert gas blowing in ladles»], *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, № 7, pp. 24-28, 2002. (Rus.)
7. A.D. Kulik, M.A. Kashcheev, A.A. Pokhvalityi, and S.S. Sotnichenko. «Sovershenstvovaniye vypuska stali iz konvertera» [«Improvement of steel tapping from the converter»], *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, № 1, pp. 18-20, 2013. (Rus.)
8. S. Nishijima, and N. Takeuchi, «Method for preventing nitrogen absorption of cr-containing molten steel», *JPN patent 2010-138446 Appl. № 2008-315479*, 11.12.2008.
9. S.P. Eronko, and S.V. Bykovskikh, *Fizicheskoye modelirovaniye protsessov vnepechnoy obrabotki i razlivki stali* [Physical modeling of out-of-furnace steel treatment and casting processes]. Kyiv, Ukraine: Tekhnika Publ., 1998. (Rus.)
10. A.A. Pohvality, E.M. Sigarev, K.I. Chubin, V.P. Poletaev, and O.V. Pohvalita, «Formuvannya hazometalevoho potoku v umovakh «khimichnoho» vakuumu u stalevypusknomu kanali» [«Formation of gas-metal flow under «chemical» vacuum conditions in the steel tapping channel»], *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprovsk'oho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Scientific works collection of Dniprovsk State Technical University (Technical sciences)*, vol. 1(34), pp. 3-8, 2019. doi: 10.31319/2519-2884.34.2019.1. (Ukr.)
11. A.P. Ohurtsov, A.D. Kulyk, M.A. Kashcheev, A.A. Pokhvalyiti, and S.S. Sotnychenko, «Povysheniye effektivnosti tekhnologii vypuska metalla iz konvertera. Model' vzaimodeystviya strui s gazom v polosti letki (Soobshcheniye 1)» [«Improving the technology of metal tapping from the converter. The model of gas-jet interaction in the tuyere cavity (Report 1)»], *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprodzerzhynsk'oho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: tekhnichni nauky – Scientific works collection of Dniprodzerzhynsk State Technical University. Technical sciences series*, № 3(23), pp. 21-26, 2013. (Rus.)
12. A.O. Vovk, V.V. Braga, Ye.M. Sigarev, A.A. Pokhvalityi, and O.A. Filina, «Doslidzhennya zakhysnoyi diyi arhonu v dysperhovanomu pototsi pry vypusku rozplavu z konvertera» [«Study of argon protective effect in dispersed flow during molten metal tapping from the converter»], in Proc. VI Int. Conf. «Innovative Technologies in Science and Education. European Experience», Dnipro, 2024, pp. 10-109. (Ukr.)

Стаття надійшла 07.11.2024

Стаття прийнята 02.12.2024

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЇ ВОГНЕТРИВІВ КОВШУ
ПРИ ВДУВАННІ ГАЗУ ВГЛИБ ВАННИ КРІЗЬ ОБЕРТОВУ ФУРМУ**

Із застосуванням ізотермічного моделювання отримані нові дані стосовно впливу переміщення газових струменів із сопел наконечника загальної обертової фурми на гідродинаміку та інтенсивність масообмінних процесів у ковшовій ванні. Досліджені особливості ерозійного зношування робочого шару футерівки великовантажного чавунозаливального ковшу під час десульфурзації вдуванням порошкоподібних реагентів крізь сопла Т-подібних наконечників загальних фурм. На основі результатів порівняльного аналізу профілю зношення робочого шару вогнетривів ковшу при використанні нерухомої та обертової конструкції фурм та чисельного моделювання динаміки зношування визначені раціональні витрати газу-носія та швидкість обертання фурми для мінімізації інтенсивності ерозії футерівки.

Ключові слова: вогнетрив, газ, гідродинаміка, ерозія, ківш, руйнування, стійкість, футерування.

Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov, G.Yu. Kryachko, I.M. Matina. Study of the erosion of ladle refractories when gas is injected deep into the bath through a rotating lance. With the use of isothermal modeling, new data were obtained regarding the influence of the movement of gas jets from the nozzles of the tip of the submersible rotating lance on the hydrodynamics and the intensity of mass transfer processes in the ladle bath. It was established that mixing the bath during the rotation of gas jets increases the mass transfer rate, since the tangential stress arising in the liquid causes the gas bubbles to be crushed, which in turn leads to an increase in the volume of the bubbling zones and the reaction surface of the phases. The increase in the total volume of the bubbling zones is 25-35% of the volume of the bath, compared to 8-10% for a stationary nozzle. Peculiarities of erosive wear of the ladle lining during desulfurization by blowing powdered reagents through the nozzles of T-shaped nozzles of lances were investigated. The highest intensity of wear with increasing gas consumption is observed in the upper part of the bucket. With an increase in the rotation speed of the lance and gas consumption, the intensity of wear decreases in the middle horizons from 0.7 to 0.4 mm/min. For the upper areas of the bucket, increasing the gas consumption from 1.0 l/min to 2.2 l/min and the rotation speed to 120 rpm leads to a decrease in intensity by 36.7%, for the middle – by 55.6%, for lower – by 28.5%. Based on the results of a comparative analysis of the wear profile of the working layer of refractories when using stationary and rotating lances and numerical modeling of the dynamics of wear, the rational consumption of the carrier gas and the rotation speed of the lance were determined to minimize the intensity of lining erosion. From the point of view of dispersing the desulfurizing reagents with a simultaneous increase in the gas saturation of the bath, it is advisable to increase the gas consumption and the rotation speed of the lance to the maximum possible values. On the other hand, from the point of view of preventing uneven wear of the lining, it is advisable to limit the speed of rotation of the gun at the level of 60-

¹ д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-8229-7877, en_sigarev@ua.fm

² здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, eskovD80@i.ua

³ канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-8773-508X, nauka_m4m@ukr.net

⁴ здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, igor.matyna66@gmail.com

75 rpm, and gas consumption – by the need to ensure a stable mode of formation of the gas powder flow without clogging the nozzles of the T-shaped tip of the lance.

Key words: refractory, gas, hydrodynamics, erosion, ladle, destruction, stability, lining.

Постановка проблеми. Дослідження закономірностей і розвиток наукових уявлень щодо взаємодії шлаку і рідкого металу з вогнетривами металургійних агрегатів, що призводять до руйнування вогнетривкового шару, є актуальною темою з часів отримання перших металів та сплавів.

Згідно з вимогами служби футерівка ковшів повинна бути терmostійкою, мати знижену теплопровідність, теплоємність і усадку, бути стійкою до корозійного та ерозійного руйнування рідкими шлаком та металом, у тому числі шлаками перемінного складу, що формуються у ході рафінування розплаву.

Стратегія сучасного проектування вогнетривкої футерівки великовантажного чавунозаливального ковша, що одночасно служить і агрегатом для позадоменної десульфурації чавуну, повинна враховувати такі фактори як термомеханічні напруження, що виникають при відхиленні температури чавуну від оптимальних значень, у періодах простою та під час заливання чавуну у ківш; механічну ерозію робочого шару вогнетривів, що обумовлено гідродинамікою металевго розплаву під час глибинного вдування реагентів-десульфураторів; умови хімічної корозії внаслідок взаємодії вогнетривів з оксидами шлаку (FeO, MnO), склад якого перманентно змінюється по ходу вдування реагентів вглиб ковшової ванни [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наповнення ковшів і переливання металу, коливання поверхні при транспортуванні ковшів і барботажі металу при продуванні ванни призводить до зношування робочого шару футерівки за ерозійним механізмом. Описи механізму та закономірностей впливу термодинамічних і кінетичних факторів на зношування вогнетривів ковшів внаслідок проникнення розплаву, корозії, ерозії та термічних ударів широко представлені у технічній літературі [2-7].

Згідно з усталеними уявленнями фізичне проникнення у вогнетриви, мікротріщини та шви викликане капілярним потоком розплаву. Так, швидкість проникнення шлаку умовно описується законом Пуазейля [5], згідно з яким вона залежить від радіуса r капіляра (відкритої пори або мікротріщини), тиску капілярного всмоктування ΔP , динамічної в'язкості рідини η , глибини її проникнення l у вогнетрив і тривалості контакту τ :

$$dl / d\tau = r^2 \cdot \Delta P / (8\eta l), \quad (1)$$

де $\Delta P = 2\sigma \cdot \cos\theta / r$ визначається властивостями проникаючого розплаву; σ – поверхневий натяг розплаву, θ – кут змочування.

При цьому l для горизонтального проникнення шлакового розплаву у пори, після інтегрування (1) з врахуванням ΔP , визначається за виразом:

$$l^2 = (\sigma \cdot 2r \cdot \cos\theta / (2\eta)) \cdot \tau, \quad (2)$$

і суттєво залежить від τ , а для вертикального проникнення за виразом:

$$l = 2\sigma \cdot \cos\theta / (r \cdot \rho \cdot g), \quad (3)$$

де ρ – густина шлаку, кг/м³; g – гравітаційна постійна, м/с².

Після зливання металу із ковша при охолодженні футерівки на повітрі градієнт температур між футерівкою і зовнішнім середовищем досягає 600-800°C для чавунозаливальних та 1400-1500°C [8] до 800-1000°C [9] для сталерозливальних ковшів відповідно. Зовнішній температурний напір формує у робочому шарі вогнетривів внутрішню температурну неоднорідність, яка призводить до різнонаправлених термічних напружень. Особливо небезпечними для вогнетривів є розтягувальні напруження, які призводять до розтріскування вогнетривкового шару і збільшення швидкості проникнення розплавів та інтенсивності руйнування футерівки.

Напруження, що перевищують межу міцності вогнетривкового матеріалу, призводять до виникнення мікротріщини, а подальший температурний вплив викликає їх подальший розвиток із наступним руйнуванням футерівки:

$$\gamma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення вогнетривкового матеріалу; ΔT – градієнт температур у шарах футерівки; E – модуль пружності вогнетривкового матеріалу.

Так, згідно із дослідженнями [9], термічні та механічні напруження у MgO-C вогнетривах призводять до виникнення локального (діркового) зношення у робочому шарі футерівки.

Відомі результати досліджень ерозійного зношення футерівки сталерозливальних ковшів із застосуванням ізотермічного [10] та математичного [11] моделювання, присвячені вивченню впливу на інтенсивність зношення геометричних параметрів ковшів [10] та розміщення дуттьових вставок у днищі [11]. У вказаних вище дослідженнях не враховується наявність шлакової фази на поверхні ковшової ванни і знос вогнетривів внаслідок хімічного проникнення шлаку.

Хімічне проникнення, яке включає хімічну взаємодію між розплавом шлаку та вогнетривом, у свою чергу, може призвести до ущільнення та хімічного або структурного розколювання останнього [3]. Градієнт хімічного потенціалу, який зазвичай асимілюється із градієнтом хімічного складу, є рухомою силою корозійного процесу. Інтенсивність та результати корозії прогнозують і пояснюють зі застосуванням термодинамічних розрахунків та за допомогою фазових діаграм із використанням програмного забезпечення (наприклад FactSage, Thermocalc та ін.). Сучасні дослідження включають методи аналізу, в яких фазові співвідношення та механізми корозії пов'язані зі змінами розмірів вогнетривких матеріалів, а також їхніми термомеханічними властивостями [12].

При використанні вітчизняних матеріалів стійкість сталерозливних ковшів з шамотними футерівками складає 10-19 плавов (питома витрата вогнетривів 5-12 кг/т сталі), монолітних футерівок із кремнеземистих мас – 10-20 плавов (2-4 кг/т сталі) [8]. Перехід до використання периклазовуглецевих вогнетривів забезпечив зниження питомих витрат вогнетривів до 4-5 кг/т сталі, з підвищенням стійкості до 50-100 наливів. У подальшому використання монолітного корундового футерування забезпечило стійкість ковшів до 350, а низькоцементного бетону – до 500 плавов відповідно [13].

Конструкція футерівки чавунозаливальних ковшів з початку впровадження ковшової десульфурації чавуну перетерпіла ряд суттєвих змін. Так, при використанні ковшів тільки для транспортування чавуну, робочу футерівку днищ та стін виготовляли із шамотного вогнетриву різної товщини ($Al_2O_3 > 40\%$). Середня стійкість ковшів у 150 плавов, після впровадження технологій десульфурації, скоротилася до 100 плавов, що призвело до проблем із забезпеченням логістики конвертерного цеху [14]. Пошук раціональних рішень та поетапний перехід до використання андалузиту, муліту, бокситу, Al_2O_3 –SiC–C та комбінованих (сандвіч) футерівок забезпечив збільшення строку служби від 974 до 1489 плавов, при максимально досягнутому значенні у 1718 плавов. Підвищення частки Al_2O_3 у наступних поколіннях ковшових вогнетривів забезпечило підвищення корозійної стійкості, введення до їх складу вуглецю – стійкості до розтріскування і проникненню шлаку, а SiC – попередження окислення вуглецю вогнетриву.

На відміну від досліджень, присвячених зношенню футерівки сталерозливних ковшів, кількість публікацій стосовно досліджень зношення футерівки чавунозаливальних ковшів обмежена. Загальному аналізу тенденцій напрямків розвитку способів футерування сталерозливних ковшів присвячено робота [13], а закономірностям зношення футерівки – робота [15].

Особливості зношення футерівки чавунозаливальних ковшів та лопатей імелера в умовах десульфурації за KR-процесом описані у роботі [16]. Показано, що причиною сильної ерозії є температурні умови та турбулентність, спричинена обертанням лопатей. Зі застосуванням чисельного моделювання для кількісної оцінки напруження зсуву та швидкості стирання виявлено нерівномірності і локалізацію місць ерозійного зношення. Отримано кількісні кореляції швидкості стирання як функції розміру лопатей та швидкості обертання імелера.

При використанні обертових заглибних фурм для вдування реагентів-десульфураторів у ковшову ванну з відповідною зміною гідродинамічної картини [17] слід очікувати і зміни у профілі ерозійного руйнування вогнетривів потоками металевого розплаву.

Мета роботи – дослідження впливу переміщення газових струменів, що формуються на виході із сопел Т-подібного наконечника заглибної обертової фурми, на інтенсивність масообмінних процесів у ковшовій ванні та особливості зношення робочого шару футерівки великовантажного чавунозаливального ковшу по ходу вдування порошкоподібних реагентів вглиб ванни.

Виклад основного матеріалу. Ковшову десульфурацію чавуну в конвертерному цеху ПрАТ «Камет-Сталь» здійснюють у 230-т чавунозаливальних ковшах (далі ківш) за коінжекційною схемою глибинного вдування сумішей на основі флюїдизованого вапна та гранульованого магнію [18]. Вогнетривке футерування ковшів тришарове і складається із теплоізоляційних плит, арматурного та робочого шарів. Окремі фізико-хімічні показники вогнетривких виробів, що

використовують для футерування ковшів, представлені у табл. 1. Стійкість вогнетривів робочого шару, при гарантованій постачальниками стійкості у 800 плавов (у середньому до 80 операцій по десульфурації чавуну), протягом останніх років склала від 818 до 1281 плавов (при питомих витратах вогнетривів 1,16–1,25 кг/т чавуну).

Таблиця 1

Фізико-хімічні характеристики вогнетривкої футерівки
чавунозаливальних 230-т ковшів ПрАТ «Камет-Сталь»

Варіант 1		Варіант 2	
Теплоізоляційний шар			
Теплоізоляційні плити		Теплоізоляційна цегла	
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ , %	≥95	Al ₂ O ₃ , %	≥40
K ₂ O+Na ₂ O, %	≤0,8	SiO ₂ , %	≥40
Fe ₂ O ₃ , %	≤1,5	Об'ємна густина, г/см ³	≤1,0
Уявна густина, г/см ³	≤0,85	Лінійне розширення (при 1350 °C), %	≤2
Арматурний шар			
Високоглиноземна цегла		Пірофілітова цегла	
Al ₂ O ₃ , %	≥65	Al ₂ O ₃ , %	≤23
Fe ₂ O ₃ , %	≤5	SiO ₂ , %	≥73
Відкрита пористість, %	≤28	Fe ₂ O ₃ , %	≤1,8
Об'ємна густина, г/см ³	≈ 2,45	Об'ємна густина, г/см ³	≥2,17
Робочий шар			
Алюмокарборундовуглецевисті вироби		Алюмокарбідокремнієві вироби	
Al ₂ O ₃ , %	≥55	Al ₂ O ₃ , %	≥60
SiC+C, %	≥16	SiC, %	≥12
C, %	≤10	C, %	≥9
Відкрита пористість, %	≥2,75	Відкрита пористість, %	≤10
Об'ємна густина, г/см ³	≥4,0	Об'ємна густина, г/см ³	≥2,85

Дослідження гідрогазодинамічної картини у ковшовій ванні при вдуванні газу крізь сопла обертової фурми проводили з використанням авторської методики на установці ізотермічного моделювання, схема якої, основні параметри об'єкта та моделі заливального ковша представлені у роботі [19].

З метою запобігання утрудненням у формуванні струменів на виході із сопел Т-фурми торця її наконечника розташовували на відстані 20-25 мм від днища моделі ковша. При моделюванні використовували одно- та двосоплові Т-наконечники фурм із циліндровими соплами діаметром 0,0012 та 0,001 мм відповідно. Швидкість обертання фурми навколо вертикальної осі змінювали в межах від 0 до 120 об/хв при витратах газу (компресорного повітря, тиск 5,2-5,5 МПа) на продування ванни від 1,0 до 2,2 л/хв відповідно.

На першому етапі, з метою уточнення впливу швидкості обертання сопел наконечника заглибної фурми і витрат газу на інтенсивність перемішування рідкої ванни, у різні зони ванни за її глибиною вводили рідкий індикатор. Оптимізацію плану експерименту здійснювали за критерієм ортогональності. В якості факторів впливу прийняли витрату газу (Q , л/хв), швидкість обертання фурми (V , об/хв) та відношення висоти вводу індикатора до глибини рідкої ванни (H , м).

Перемішування ванни при обертанні газових струменів підвищує швидкість масовіддачі, оскільки дотичне напруження, що виникає в рідині, викликає подрібнення газових пупирів, що у свою чергу призводить до збільшення об'єму барботаєжних зон та поверхні реагування фаз. При незначній газонасиченості переміщення потоків в рідкій ванні відбувається при крупномасштабній структурі. Із зростанням газонасиченості ванни відносна швидкість підвищується (формується кільцева структура або структура туману).

За результатами експериментів встановлено, що в дослідженому діапазоні витрат газу при обертанні фурми як з одним, так і з 2-ма соплами, розташованими під кутом 90 град до

вертикальної осі, найкраще розосередження і подрібнення газових бульбашок забезпечується при швидкості обертання у 120 об/хв пропорційно збільшенню витрат газу. При мінімізації Q мінімальна тривалість усереднення ванни τ_{yc} (11 с) забезпечується вдуванням газу крізь сопла нерухомої загальної фурми. Пропорційно підвищенню величини Q збільшується і тривалість досягнення 95% усереднення ванни (до 19-22 с), що обумовлено переходом від бульбашкового до струменевого («пробійного») режиму продування.

Використання обертової фурми призводить до зменшення τ_{yc} . Так, мінімальних значень τ_{yc} (<9,5 с) було досягнуто в умовах продування ванни з $Q = 2,2$ л/хв крізь сопло фурми, що обертається зі швидкістю 120 об/хв. При мінімальній (у досліджених діапазонах) витраті газу τ_{yc} зменшується пропорційно підвищенню швидкості обертання фурми. У східних, з точки зору місця вводу індикатору, умовах при використанні нерухомої фурми τ_{yc} склало 20,5 с, а при обертанні фурми зі швидкістю 50 об/хв – менш ніж 13 с, що свідчить на користь обґрунтованості переходу до застосування обертових фурм.

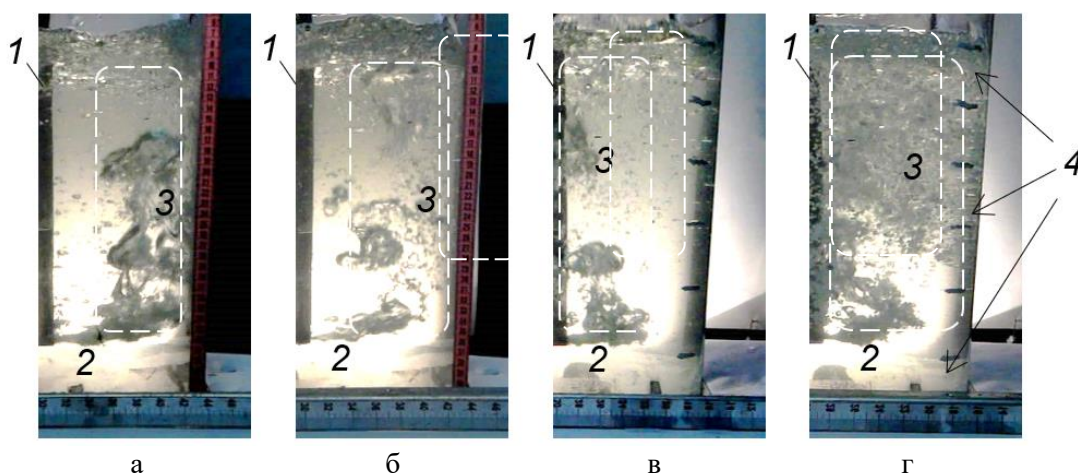


Рис. 1 – Картина диспергування газових об'ємів при вдуванні газу крізь сопло загальної фурми з Т-подібним наконечником із витратою 2,2 л/хв (а, г) та 1,6 л/хв (б, в). а, б) – нерухома фурма; в, г) – обертова фурма. Швидкість обертання фурми – 30 об/хв (в) та 120 об/хв (г) відповідно. 1 – фурма; 2 – газовий струмінь; 3 – барботажна зона; 4 – місце введення індикатору

На відміну від утворення двох великомасштабних циркуляційних потоків, що спостерігаються при вдуванні газу крізь сопла Т-подібного наконечника нерухомої фурми (рис. 1, а, б), при використанні обертової фурми у об'ємі ванни можна виділити характерні зони:

- первинну, в межах якої відбувається заглиблення газових струменів у ванну;
- вторинну, барботажную, в нижній частині якої газові струмені, що вигинаються вгору під дією сили Архімеда і одночасно під дією сили опору вбік, протилежний напрямку обертання сопел, подрібнюються на бульбашки, і в межах якої останні спливають до поверхні ванни при малих значеннях V ;
- ряд розосереджених по об'єму ванни циркуляційних зон, число яких зростає пропорційно збільшенню V ;
- розосереджені зони виходу газових об'ємів на поверхню ванни.

Розмір спливаючих газових бульбашок зменшується пропорційно підвищенню V , а швидкість їх спливання відповідно зменшується. З врахуванням збільшення газонасиченості ванни зростання загального об'єму барботажних і циркуляційних зон складає 25-35 % від загального об'єму ванни, у порівнянні із 8-10% для нерухомої фурми (рис. 1).

Встановлені особливості зміни у гідродинаміці ванни при обертанні сопел наконечника фурми мають вплинути і на характер профілю (глибину зношення у різних зонах по висоті ($\Delta h_{фут}$)) та інтенсивність зношення робочого шару футерівки ковша.

Для вивчення одночасного впливу швидкості обертання фурми ($X_1(V)$, об/хв) та витрати газу-носія ($X_2(Q)$, л/хв) і порівняння з умовами використання нерухомої фурми, сплановано та реалізовано експеримент (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування та результати експериментів

№	Фактор впливу					А тов- щина* , мм	В товщи на, мм	С тов- щина, мм	b ₀ зони А/В/С	b ₁ зони А/В/С	b ₂ зони А/В/С	b ₁₂ зони А/В/С	Δh _{фут} зони А/В/С
	X ₁ (Q)		X ₂ (V)		X ₁ · X ₂								
	код	нат.	код	нат.									
1	+	2,2	-	30	-	26,1/ 21,1	26,2/ 22,8	26,2/ 22,6	6,25/ 4,85/ 18,8	-0,25/ -1,15/ -0,4	2,25/ 1,65/ 1,30	-1,25/ -1,35/ -0,6	5/3,4/ 3,6
2	-	1,0	+	120	-	16,2/ 6,2	20,1/ 11,1	19,0/ 12,0					10/9/7
3	+	2,2	+	120	+	20,1/ 13,1	21,1/ 17,1	23,1/ 18,1					7/4/5
4	-	1,0	-	30	+	29,5/ 26,5	30,5/ 27,5	29,0/ 25,8					3/3/3,2

* у чисельнику – вихідне значення, у знаменнику – після продування ванни

Для вивчення особливостей ерозійного зношення у якості моделі робочого шару футерівки ковшу використали пластини з гімалайської солі ($\rho = 2,185 \text{ г/см}^3$). Для порівняльного аналізу і визначення профілю зношення на поверхні пластин було виділено три контрольні зони: А – верхня частина футерівки ковшу, В – середня і С – нижня частина відповідно. У якості газу для продування рідкої ванни (води, підігрітої до температури 45°C) використали стиснене компресорне повітря (тиск 5,5 атм). З метою візуалізації потоків та врахування наявності у ванні нерозчинених частинок реагентів-десульфураторів у ванну вводили індикатори з «нульовою» плаваючістю. Після закінчення кожного експерименту проводили механічне сканування поверхні пластин із використанням шаблону і штангенциркуля (точність вимірювання 0,1 мм). Проведено серію експериментів у кожному із діапазонів швидкості обертання фурми: від 0 об/хв для нерухомої і до 120 об/хв – для обертової. Тривалість продування ванни у всіх експериментах складала 600 с.

Вигляд футерівки промислового чавунозаливального ковшу після 1718 плавок (в), моделі робочого шару футерівки до та після продування ванни, розміщення контрольних зон (А-С) на моделі футерівки (а, б) і футерівки на стіні ковшу (г), представлені на рис. 2.

За результатами обробки отриманих експериментальних даних встановлено основні залежності між інтенсивністю вдування газу, швидкістю обертання фурми та глибиною зношення футерівки ковшу у контрольних зонах, у тому числі при роботі Т-фурми у нештатному режимі (із закупорюванням одного із сопел наконечника [18]).

Отримані математичні моделі, придатні для прогнозування змін профілю робочого шару футерівки ковшу (зміни товщини футерівки $\Delta h_{\text{фут}}$ у проміжку від границі шлак-метал до днища ковшу) при використанні обертової фурми:

Зона А

$$\Delta h_{\text{фут}}^{\text{натА}} = -2,392 + 3,057 \cdot Q + 0,1239 \cdot V - 0,0463 \cdot Q \cdot V \quad (5)$$

Зона В

$$\Delta h_{\text{фут}}^{\text{натВ}} = -0,835 + 1,835 \cdot Q + 0,117 \cdot V - 0,0499 \cdot Q \cdot V \quad (6)$$

Зона С

$$\Delta h_{\text{фут}}^{\text{натС}} = 0,932 + 1,010 \cdot Q + 0,0644 \cdot V - 0,0222 \cdot Q \cdot V \quad (7)$$

Встановлено, що параметри вводу газу у ванну суттєво впливають на глибину та інтенсивність зношення робочого шару футерівки. Найбільша глибина і інтенсивність зношення (I) спостерігається у верхніх горизонтах футерівки (зона А), найменша – у нижніх (зона С). При використанні нерухомої заглибної Т-фурми при мінімальних (у дослідженому діапазоні) витратах газу I зменшується від верхніх горизонтів до нижніх, що пояснюється особливостями гідродинаміки ковшової ванни [17, 19]. Зі збільшенням витрат газу до максимальних (2,2 л/хв)

спостерігається мінімізація величини I у середніх горизонтах на футерівці з подальшим її збільшенням по мірі опускання до днища ковшу. Так, при витратах газу у 2,2 л/хв у зоні B футерівки величина I на 38-44% менше, ніж у верхніх. Найбільші величини I – у зоні A при максимізації витрат газу. Збільшення витрат газу на 55% призводить до збільшення I на 36%.

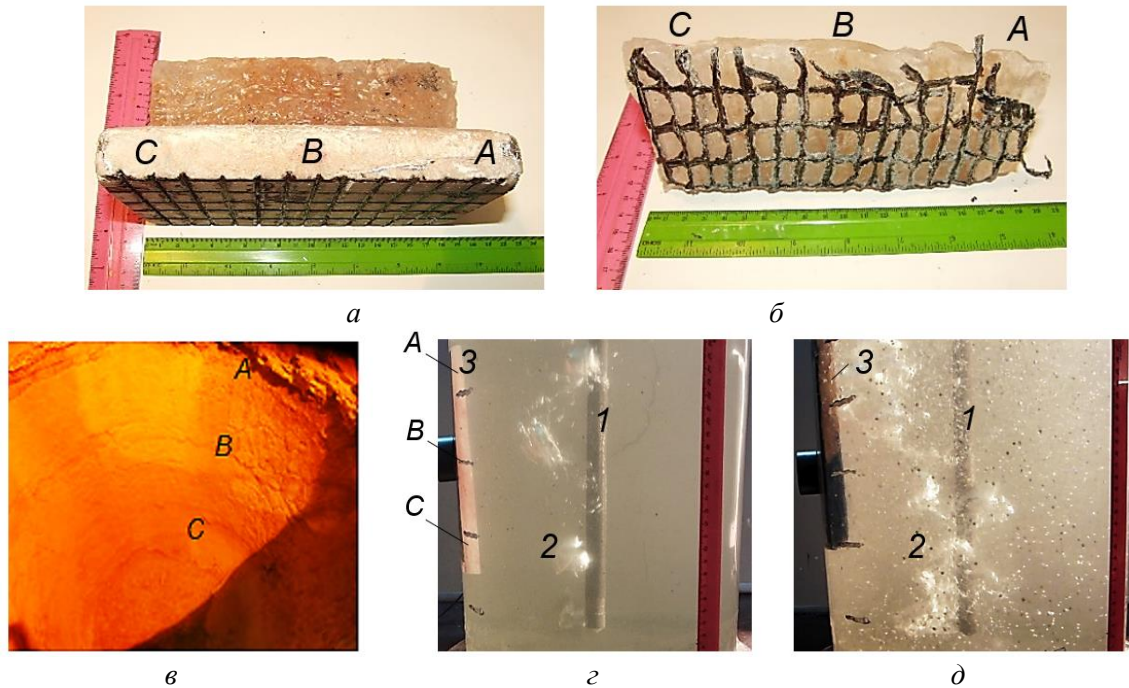


Рис. 2 – Вигляд моделі робочого шару футерівки до (а) та після продування ванни (б), футерівки промислового чавунозаливального ковшу після 1718 плавов [14] (в), розміщення моделі футерівки на стіні ковшу (г) та картина формування барботажних зон у ванні під час її продування газом крізь сопло наконечника фурми, що обертається зі швидкістю 60 об/хв (д): 1 – фурма; 2 – газові бульбашки; 3 – модель робочого шару вогнетриву на стіні ковша

Тренд на зменшення I зі зростанням швидкості обертання та витрат газу зберігається на всіх горизонтах футерівки. Найбільші зміни у інтенсивності зношення при зростанні швидкості обертання фурми та витрат газу спостерігаються у зонах, наближених до зони B . Так, із підвищенням швидкості обертання фурми і найбільших, у дослідженому діапазоні, витратах газу (2,2 л/хв) величина I зменшується у середніх горизонтах футерівки по висоті з 0,7 до 0,4 мм/хв. В цілому, для верхніх горизонтів збільшення витрат газу з 1,0 л/хв до 2,2 л/хв і швидкості обертання до 120 об/хв призводить до зменшення I на 36,7 %, для середніх – на 55,6%, для нижніх – на 28,5 % відповідно, що може бути пов'язано зі збільшенням кількості локалізованих барботажних зон у середній частині ковшової ванни, як показано раніше [17, 19].

До визначеного граничного значення швидкості обертання фурми, окремо для кожної із досліджених зон (A - C), збільшення витрат газу призводить до підвищення I («перехідна» зона). Так, незалежно від витрат газу, «перехідна» зона для верхніх горизонтів футерівки досягається при збільшенні обертів фурми до 65 об/хв, для середнього – до 37 об/хв, для нижніх – до 46 об/хв відповідно. Після досягнення вказаних значень зменшення I пропорційне зростанню Q та V . Так, наприклад, максимізація I (у досліджених діапазонах) спостерігається при швидкості обертання фурми у 120 об/хв при мінімальній витраті газу (1,0 л/хв), а мінімальна I для усього діапазону значень Q – при 55-60 об/хв (рис. 3).

Найбільша інтенсивність зношення та ширина діапазону її зміни при збільшенні Q спостерігається у верхній частині ковшу (зона A), наближеній до границі розділу «шлак-метал».

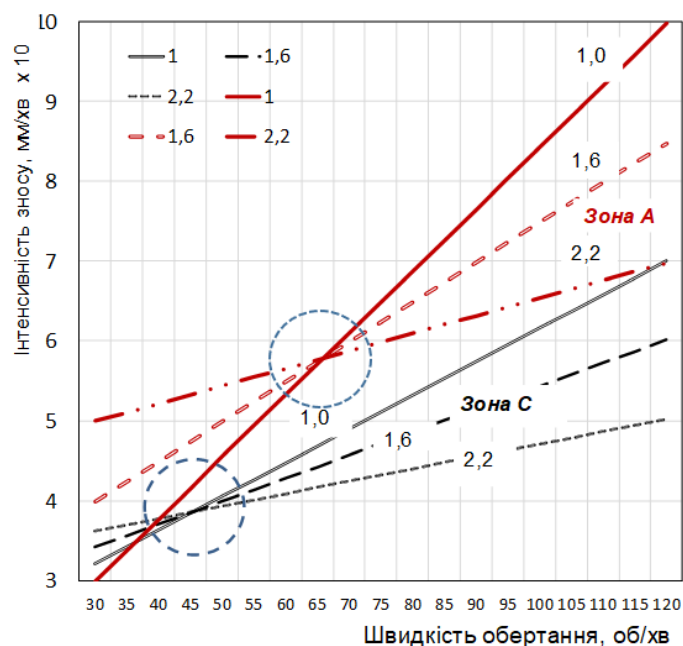


Рис. 3 – Вплив зміни швидкості обертання заглибної фурми на інтенсивність зношення робочого шару футерівки ковшу у верхній (А) та нижній (С) зонах. «Перехідні зони» на рисунку позначені пунктиром і служать орієнтиром для встановлення раціональної швидкості обертання фурми зі забезпеченням рівномірності зношення футерівки ковшу по висоті

Діапазон швидкості обертання фурми у 60-75 об/хв доцільно вважати таким, що забезпечує умови для рівномірного зношення робочого шару футерівки по висоті (рис. 4).

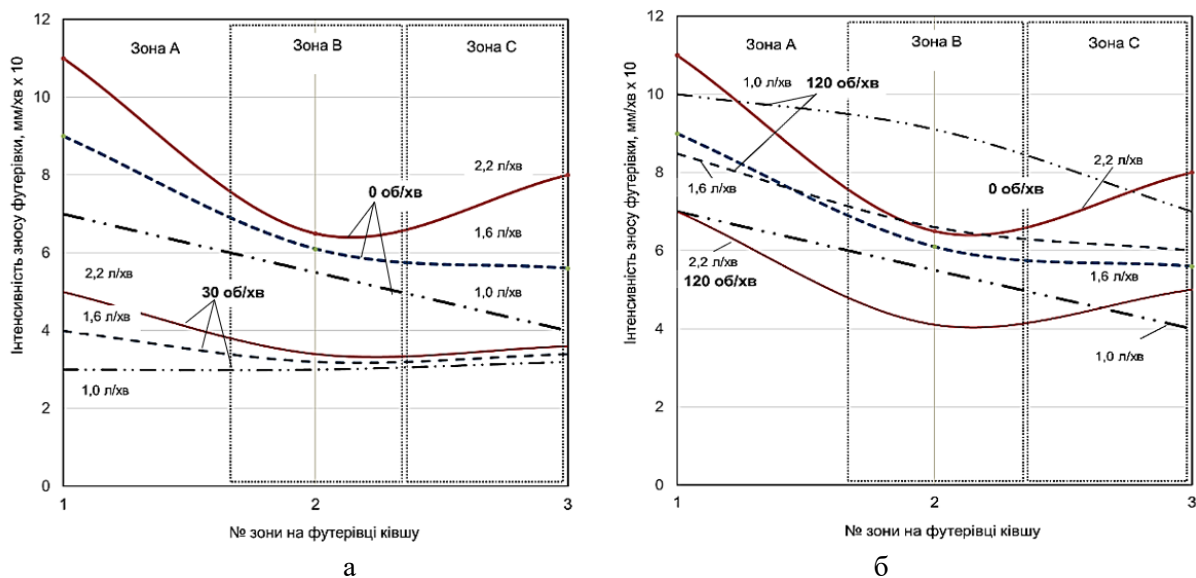


Рис. 4 – Залежність інтенсивності зношення робочого шару футерівки ковшу у різних зонах від витрат газу на продування ванни при переході до використання обертової заглибної фурми: а – 30 об/хв; б – 120 об/хв. 0 об/хв – нерухома фурма

Висновки

Мінімізація ширини діапазону зношення футерівки та рівномірність зношення по висоті ковшу, у порівнянні із нерухомою фурмою, забезпечується при 55-60 об/хв у всьому дослідженому діапазоні витрат газу. З точки зору розосередження реагентів-десульфураторів із одночасним збільшенням газонасиченості ванни, доцільно збільшувати витрати газу і швидкість обертання фурми до максимально можливих значень. З іншого боку, з точки зору попередження нерівномірного зношення футерівки, доцільним є обмеження швидкості обертання фурми на рівні 60-75 об/хв, а витрат газу – необхідністю забезпечення сталого режиму формування газопорошкового потоку без закупорювання сопел Т-подібного наконечника фурми. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації конструкції футерівки чавунозаливального ковшу в умовах використання обертових конструкцій заглибних фурм для десульфуратії чавуну.

Перелік використаних джерел:

1. Сульфідна смісь та властивості модифікованих ковшових шлаків / Сігарьов Є.М., Єськов Д.В., Крячко Г.Ю., Матина І.М. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. До 95 річчя кафедри металургії ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету. С. 76-88. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.7>.
2. Смирнов А. Н., Жемеров С. Г., Штепан Е. В. Исследование стойкости огнеупорного слоя при продувке металла в сталеразливочном ковше инертным газом. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2011. Вип. 12(177). С. 130-136.
3. Bennett J. P., Smith J. D. Fundamentals of Refractory Technology. The American Ceramic Society, 2001. 316 p.
4. Schacht C. A. Refractories Handbook. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA. 2004. 516 p.
5. Lee W. E., Zhang S. Melt Corrosion of Oxide and Oxide-Carbon refractories. *International Materials Reviews*. 1999. Vol. 44. Iss. 3. Pp. 77-104. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066099101528234>.
6. Lee W. E. Theory, Experiment and Practice of Slag Attack on Refractories. *Tehran International Conference on Refractories*, 4-6 May 2004. Pp. 13-27.
7. Buhr A. Refractories for Secondary Steelmaking Metallurgy. *CN-Refractories*. 1999. No. 6(3). Pp. 19-30.
8. Умови служби футеровки сталерозливних ковшів і вимоги, пропонувані до вогнетривких матеріалів / Плохих П. А., Вожол М. А., Хавалиць Ю. В., Плохих А. П. *Метал та лиття України*. 2021. Том 29. № 3(326). С. 21-25. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>.
9. Corrosion Mechanism of a Density-Reduced Steel Ladle Lining Containing Porous Spinel-Calcium Aluminate Aggregates / Ch. Wohrmeyer et al. *Ceramics*. 2020. No. 3. Pp. 155-170. doi: <https://doi.org/10.3390/ceramics3010015>.
10. Molchanov L. S., Lantukh O. S., Synehin Y. V. Physical Modeling of Erosion Destruction of Teeming Ladle Lining in the Process of Its Exploitation. *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*. 2019. No. 1. Pp. 65-71. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-142-1-65-71>.
11. Krasnikov K., Lyzhov M., Fatykhova T. Computer Analysis of Influence of Melt Blowing Modes on Ladle Lining Mechanical Erosion. *Математичне моделювання*. 2023. № 1(48). С. 132-137. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(48\)2023.280789](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280789).
12. Zushu L., Kusuhiro M., Zainan T. Reactions Between MgO-C Refractory, Molten Slag and Metal. *ISIJ International*. 2000. Vol. 40. Iss. Suppl. Pp. 101-105. DOI: https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.Suppl_S101.
13. Застосування вогнетривких матеріалів для сталерозливного ковша / Стоянов О. М., Нізяєв К. Г., Малій Х. В., Кухар В. В. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 69-78. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288166>.
14. Milan C. Application of Refractory Materials in the BOF Steel Plant in TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY. *The 7th European Oxygen Steelmaking Conference*, Trinec, Czech Republic, September 9-11, 2014.

15. Охотский В. Б., Зражевский А. Д. Закономерности износа ковшевой футеровки. Результаты исследований. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 3. С. 24-28.
16. Computational Evaluation of Flow-Induced Abrasion of Blade and Ladle in Kanbara Reactors for Hot Metal Desulfurization / Li Q et al. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2022. Vol. 74. Pp. 1588-1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05120-z>.
17. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating tuyere / Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I., Zarandiya S. A. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41(6). Pp. 487-497. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091211060155>.
18. Єськов Д. В., Сігарьов Є. М. Параметри вдування реагентів та закупорювання Т-подібних наконечників фурм. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. Вип. 1(44). С. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.2>.
19. Розподіл металевих крапель між газовою та шлаковою фазами при продуванні ковшової ванни / Сігарьов Є. М., Єськов Д. В., Похвалітій А. А., Манукян Т. А. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2022. Вип. 2(41). С. 9-18. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.41.2022.1>.

References:

1. Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov, G.Yu. Kryachko, and I.M. Matina, «Sulfidna yemnist ta vlastyvoli modyfikovanykh kovshovykh shlakiv» [«Sulfide capacity and properties of modified bucket slags»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, To the 95th anniversary of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov of the Dniprovsky State Technical University, pp. 76-88, 2024. doi: **10.31319/2519-2884.tm.2024.7**. (Ukr.)
2. A.N. Smirnov, S.G. Zhemerov, and E.V. Shtepan, «Yssledovanye stoikosty ohneupornoho sloia pry produvke metalla v stalerazyvochnom kovshe ynertnim hazom» [«Investigation of the resistance of the refractory layer during blowing of metal in a steel ladle with inert gas»], *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific papers of Donetsk national technical university*, № 12(177), pp. 130-136, 2011. (Rus.)
3. J. P. Bennett, and J. D. Smith, *Fundamentals of Refractory Technology*. USA: The American Ceramic Society, 2001.
4. C.A. Schacht, *Refractories Handbook*. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2004.
5. W.E. Lee, and S. Zhang. «Melt Corrosion of Oxide and Oxide-Carbon refractories», *International Materials Reviews*, № 44(3), pp. 77-104, 1999. doi: **10.1179/095066099101528234**.
6. W.E. Lee, «Theory, Experiment and Practice of Slag Attack on Refractories», in Proc. Tehran International Conference on Refractories, 2004, pp. 13-27, 2004.
7. A. Buhr, «Refractories for Secondary Steelmaking Metallurgy», *CN-Refractories*, № 6(3), pp. 19-30, 1999.
8. P.A. Plokhiih, M.A. Vozhol, Yu.V. Khavalits, and A.P. Plokhiih, «Umovy sluzhby futerovky stale-rozlyvnykh kovshiv i vymohy, proponovani do vohnetryvkykh materialiv» [«Service conditions of steel-pouring ladle lining and conditions for refractory materials»], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, № 29(326), pp. 21-25, 2021. doi: **10.15407/steelcast2019.10.064**. (Ukr.)
9. Ch. Wohrmeyer, J. Gao, Ch. Parr, M. Szepizdyn, R.-M. Mineau, and Z. Junhui, «Corrosion Mechanism of a Density-Reduced Steel Ladle Lining Containing Porous Spinel-Calcium Aluminate Aggregates», *Ceramics*, no. 3, pp. 155-170, 2020. doi: **10.3390/ceramics3010015**.
10. L.S. Molchanov, O.S. Lantukh, and Y.V. Synehin, «Physical Modeling of Erosion Destruction of Teeming Ladle Lining in the Process of Its Exploitation», *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*, № 1, pp. 65-71, 2019. doi: **10.31649/1997-9266-2019-142-1-65-71**.
11. K. Krasnikov, M. Lyzhov, and T. Fatykhova, «Computer Analysis of Influence of Melt Blowing Modes on Ladle Lining Mechanical Erosion», *Mathematical modeling*, № 1(48), pp. 132-137, 2023. doi: **10.31319/2519-8106.1(48)2023.280789**.

12. L. Zushu, M. Kusuhira, and T. Zainan, «Reactions Between MgO-C Refractory, Molten Slag and Metal», *ISIJ International*, vol. 40, iss. Suppl, pp. 804-815, 2000. doi: 10.2355/isijinternational.40.Suppl_S101.
13. O.M. Stoianov, K.H. Nizhaev, Kh.V. Malii, and V.V. Kukhar, «Zastosuvannia vohnetryvkykh materialiv dlia stalerozlyvnoho kovsha» [«Application of refractory materials for steel ladles»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, № 46, pp. 69-78, 2023. doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288166. (Ukr.)
14. C. Milan, «Application of Refractory Materials in the BOF Steel Plant in TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY», in Proc. The 7th European Oxygen Steelmaking Conference, Trinec, Czech Republic, 2014.
15. V.B. Okhotskii, and A.D. Zhrazhevskii, «Zakonomernosty yznosa kovshevoi futerovky. Rezultati yssledovaniy» [«Patterns of bucket lining wear. Results of studies»], *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promishlennost – Metallurgical and mining industry*, № 3, pp. 24-28, 2014. (Rus.)
16. Q. Li, S. Ma, X. Shen, M. Li, and Z. Zou, «Computational Evaluation of Flow-Induced Abrasion of Blade and Ladle in Kanbara Reactors for Hot Metal Desulfurization», *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 1588-1600, 2022. doi: 10.1007/s11837-021-05120-z.
17. E.N. Sigarev, A.G. Chernyatevich, K.I. Chubin, and S.A. Zarandiya, «Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating tuyere», *Steel in Translation*, № 41(6), pp. 487-497, 2011. doi: 10.3103/S0967091211060155.
18. D.V. Yeskov, and Ye.M. Sigarev, «Parametry vduvannia reahentiv ta zakuporiuvannia T-podibnykh nakonechnykh furm» [«Reagents injection parameters and clogging t-shaped lance»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, № 1(44), pp. 16-26, 2024. doi: 10.31319/2519-2884.44.2024.2. (Ukr.)
19. Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov, A.A. Pokhvalitii, and T.A. Manukian, «Rozpodil metalevykh krapel mizh hazovoiu ta shlakovoi fazamy pry produvanni kovshovoi vanny» [«Distribution of metal droplets between gas and slag phases during bucket bath blowing»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, № 2(41), pp. 9-18, 2022. doi: 10.31319/2519-2884.41.2022.1. (Ukr.)

Стаття надійшла 27.11.2024

Стаття прийнята 10.12.2024

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандарту – ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»). Список джерел повинен бути складений в порядку спогаду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається пристайейна бібліографія латиницею **References**, оформлена з використанням стилю цитування IEEE Citation Style.

Стаття приймається до розгляду тільки при наявності відповідних супровідних документів та електронного варіанту на електронному носії у вигляді текстового файлу у форматі редактора Microsoft Office Word.

Стаття може бути представлена на українській або англійській мовах в макетному варіанті. Формат листа – А4. Розміри полів: верхнє, нижнє – по 20 мм; ліве, праве – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з нарядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 – науковий ступінь, вчене звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, ORCID при наявності, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті, в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (**у двох екземплярах**).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/requirements). Архів видань див.: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/issue/archive.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються.

Повністю оформлені статті і необхідні документи передаються в редакцію збірника відповідальному секретарю Савенко Ользі Сергіївні, тел.: (098) 480-24-03.

Підписано до друку 26.12.2024 р.

Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 25,36. Тираж 100.

Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу. Ціна договірна