

Міністерство освіти і науки України

---

---

# Системні технології

System technologies

---

5 (160) 2025

---

*Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*

*Засновано у січні 1997 року.*

**У випуску:**

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ  
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –  
Випуск 5 (160). - Дніпро, 2025. – 241 с.  
ISSN 1562-9945 (Print).  
ISSN 2707-7977 (Online).

### Редакційна колегія випуску:

**Алпатов А.П.** - д.т.н., проф. (відп. редактор)  
**Архипов О.Є.** - д.т.н., проф.  
**Білозьоров В.Є.** - д.ф.-м.н., проф.  
**Бабічев С.А.** (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.  
**Єрьомін О.О.** - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні  
технології та організація  
сучасного виробництва

**Гече Ф.Е.** - д.т.н., проф., (відп. редактор)  
**Гуда А.І.** - д.т.н., проф.  
**Гнатушенко Вік.В.** - д.т.н., проф.  
**Кіріченко Л.О.** - д.т.н., проф.

Математичне  
та програмне забезпечення  
інтелектуальних систем

**Гнатушенко В.В.** - д.т.н., проф., (відп. редактор)  
**Гожий О.П.** - д.т.н., проф.  
**Светличний Д.С.** (Польща) - д.т.н., проф.  
**Хандецький В.С.** - д.т.н., проф.

Системні технології обробки  
інформації  
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради  
Українського державного університету науки і технологій  
від 29.01.2025 р., № 7

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Науки, 4  
Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»  
кафедра Інформаційних технологій та систем.  
Тел. +38(097)6854525  
E-mail: [st@nmetau.edu.ua](mailto:st@nmetau.edu.ua)  
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,  
ІВК «Системні технології», 2025

Б.В. Молодець, Т.М. Булана, Д.О. Болдирев

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ ПОГОДНИХ УМОВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

*Анотація:* Робота присвячена розробці інформаційної технології моделювання погоди, застосуванням глибокого навчання в задачах прогнозування атмосферних явищ. В якості моделі було обрано FourCastNet з високоефективною обробкою геофізичних даних, яка дала можливість навчатися на великих масивах історичної метеорологічної інформації та забезпечила оперативне прогнозування з високою просторовою роздільною здатністю. В якості джерела початкових умов було обрано модель GFS з асиміляцією GDAS, які надають дані з роздільною здатністю  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~28 км). Це дозволило отримати кращу деталізацію атмосферних процесів та забезпечити можливість використання системи в режимі реального часу та подолати обмеження базової роздільної здатності моделей типу ERA5 (приблизно 31 км). Для адаптації глобальних прогнозів з урахуванням геопросторових параметрів було використано модифіковану архітектуру типу UNet, яка виконує просторову інтерполяцію на основі інформації з найближчих метеостанцій. В статті детально розглянуто архітектуру створеної інформаційної системи прогнозування. Запропонований підхід збільшує точність прогнозування для окремих точок, що є особливо актуальним для аграрного планування та роботи систем раннього оповіщення.

*Ключові слова:* інформаційна система, прогнозування атмосферних явищ, обробка метеорологічних даних, нейронні мережі, UNet архітектура, модель FourCastNet

**Постановк проблеми.** У сучасному світі, де зростає частота екстремальних погодних явищ та ускладнюється вплив кліматичних змін на соціально-економічні процеси, виникає нагальна потреба в оперативному та точному прогнозуванні атмосферних умов. На сьогоднішній день усі методи передбачення погодних умов можна умовно розділити на дві групи - це традиційні чисельні методи моделювання, та методи засновані на штучному інтелекті. Моделювання погоди особливе значення для наступних шарів населення: метеорологів, аграріїв, працівників служб надзвичайних ситуацій, транспортних компаній, енергетиків, а також дослідників у сфері кліматології та екології. Для фермерів це дозволяє планувати сільськогосподарські роботи з урахуванням погодних умов, а для авіа- та морських перевізників — забезпечувати безпечну логістику. Урядові структури та служби цивільного захисту можуть використовувати прогнози для підготовки до стихійних лих, мінімізуючи потенційні збитки та рятуючи

людські життя. Крім того, високоточне моделювання погоди є критичним для довгострокового моніторингу кліматичних змін і формування екологічної політики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В статті [1] розглядається спроектована система прогнозування на основі штучного інтелекту (AIFS) – модель прогнозування на основі даних, розроблена Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). Модель має модульну архітектуру та підтримує паралельне навчання на високоточних даних. Її прогнози оцінюються порівнянням з NWP-аналізом і спостереженнями, демонструючи високу точність для атмосферних змінних, погодних параметрів на поверхні та треків циклонів. Система запускається чотири рази на день разом із моделлю ECMWF, а результати доступні публічно.

В статті [2] проаналізовано інтеграцію штучного інтелекту з чисельними моделями прогнозування погоди на різних етапах моделювання. Розглянуто сучасні архітектури, такі як RNN, CNN, LSTM, MetNet, FourCastNet і GraphCast, які здатні працювати з високою просторовою роздільною здатністю та фокусуватися на окремих атмосферних явищах. Перелічені моделі демонструють потенціал у підвищенні точності прогнозів, однак на сьогодні вони переважно використовуються як допоміжні інструменти — для обробки, асиміляції та підготовки даних. Це дозволяє покращувати роботу традиційних моделей прогнозування (базуються на фізичних рівняннях), та оминати обмеження прогнозування в режимі реального часу. І хоча традиційні моделі можуть показувати кращий результат на великих територіях моделювання, для моделювання погоди на невеликих територіях, нейронні мережі можуть показувати кращий результат завдяки покращенню вхідних даних [3], а саме: збільшення роздільної здатності вхідних параметрів, таких як рельєф та історичні стаціонарні дані.

**Мета дослідження.** Мета дослідження полягає в розробці ефективної інформаційної технології для прогнозування атмосферних явищ шляхом інтеграції сучасних моделей глибокого навчання, зокрема FourCastNet та модифікованої архітектури UNet, з глобальними метеорологічними даними (GFS з асиміляцією GDAS) з метою підвищення точності, швидкодії та локальної адаптації прогнозів у режимі реального часу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У роботі у якості моделі з моделювання глобальних даних було обрано модель FourCastNet [4]. Ця модель прогнозування погоди, заснована на методах глибокого навчання, розроблена дослідниками з NVIDIA та спільно з вченими з ряду університетів. Вона поєднує нейронні мережі з архітектурою трансформерів та спеціально адаптованими обчислювальними блоками для обробки геофізичних даних. Модель навчається на великих обсягах історичних метеорологічних даних (наприклад, з ERA5) і здатна здійснювати прогнозування погоди з високою просторовою роздільною здатністю — до  $0.25^\circ$  — у сотні разів швидше, ніж традиційні чисельні методи, при цьому зберігаючи порівняну точність.

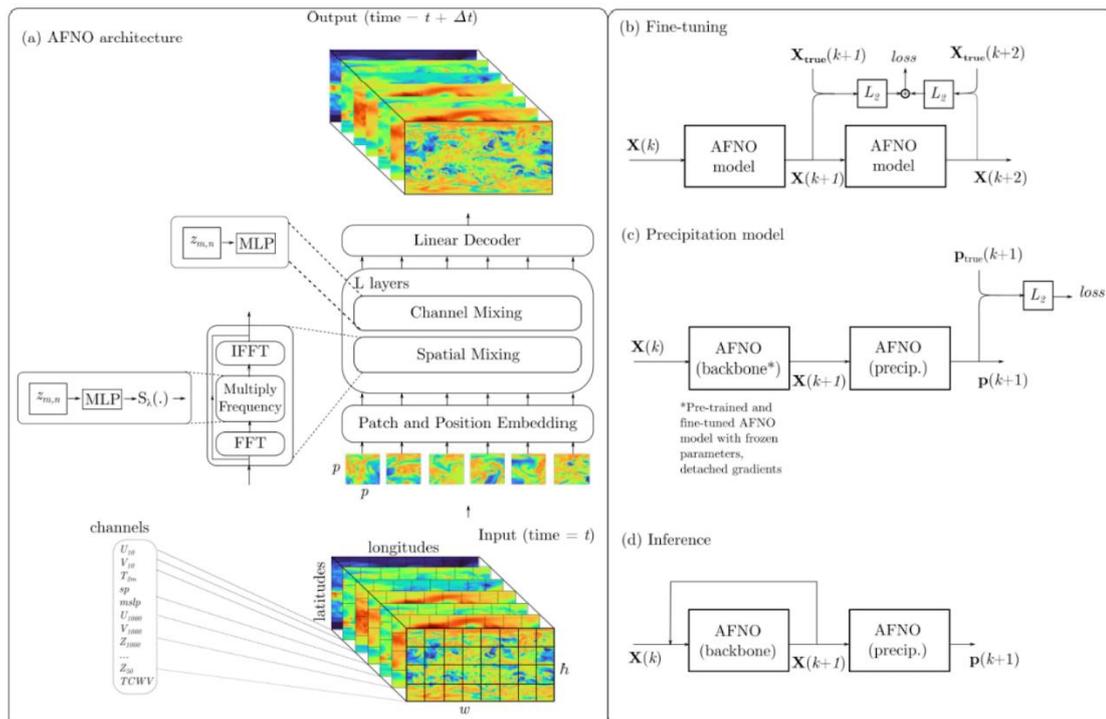


Рисунок 1 - Схема моделі FourCastNet [4]

FourCastNet демонструє вражаючу продуктивність завдяки ефективному використанню GPU-архітектури, що дозволяє здійснювати глобальні прогнози погоди всього за кілька секунд. Це відкриває нові можливості для оперативного реагування на погодні зміни, а також дає змогу створювати ансамблеві прогнози в реальному часі. Завдяки своїй гнучкості та швидкості модель має великий потенціал для інтеграції в системи раннього попередження, а також для використання в мобільних додатках, агросекторі та енергетичному плануванні [5].

Загальна схема роботи моделі з погодними зображена на рисунку 2.

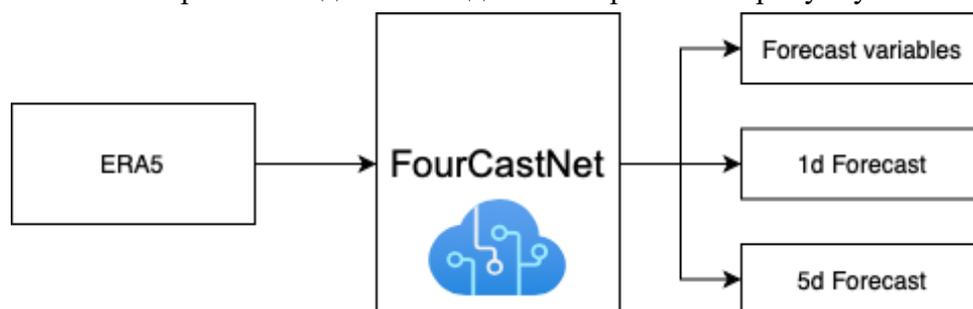


Рисунок 2 - Принцип роботи моделі на основі даних ERA5

Для навчання спочатку було обрано датасет [6]. На основі даних ERA5 було проведено моделювання та порівняння отриманих даних, а саме значення температури із даними замірів реальної станції впродовж місяця. RMSE двох часових рядів склало 3 градуси за цельсієм.

Дані моделі ERA5 мають роздільну здатність  $\sim 31$  км, а надання цих даних відбувається із затримкою відносно поточного часу, оскільки необхідний час на обробку да-

них із земних станцій. З метою поліпшення роздільної здатності базових даних, а також можливості використання прогнозування у реальному часі глобальну модель було змінено на модель GFS, для навчання використано її версію з асиміляцією даних GDAS [7].

Модель GDAS (Global Data Assimilation System) — це глобальна система збору, обробки та аналізу метеорологічних даних, яка використовується для створення початкових умов для чисельного прогнозування погоди, зокрема для моделі GFS. Вона поєднує дані з наземних станцій, супутників, радарів та інших джерел, забезпечуючи максимально точну початкову картину атмосфери. Роздільна здатність GDAS зазвичай становить близько  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (приблизно 28 км на екваторі), що дозволяє моделі охоплювати глобальні процеси з достатньо високою деталізацією для оперативного прогнозування.

Навчальна та тренувальна вибірки були створені з набору даних, що зберігається у s3 сховищі [8]. Для навчання було обрано період проміжком 10 останніх років.

Після навчання RMSE змодельованих даних та температурних показників зі станції склало 2 градуси, що поліпшує початковий результат та дає змогу прогнозувати дані у режимі реального часу.

Для покращення глобальної моделі GFS було розроблено парсер повірених станцій моніторингу погоди, це дає змогу доповнювати дані моделі на основі локальних замірів та заносити ці зміни під час розрахунків моделі FourCastNet.

На основі моделі UNet [9] було розроблено алгоритм з інтерполяції глобальних даних для покращення якості прогнозу для конкретного користувача. Цей підхід здійснює інтерполяцію ітеративно, поступово "захоплюючи" відсутні значення з країв до центру. На кожному кроці обчислення охоплюють лише ті пікселі з пропущеними значеннями, які оточені певною кількістю валідних сусідніх пікселів — спочатку восьми, з подальшим зменшенням цієї кількості до трьох. Після досягнення порогу в три сусіди, інтерполяція продовжується доти, поки всі пропуски не буде заповнено.

Метод ефективно справляється як із поодинокими "островами" пропусків, так і з великими блоками, в яких центральні пікселі оточені виключно відсутніми значеннями. Завдяки обробці зовнішніх шарів даних із максимальною кількістю сусідніх валідних значень, Процес інтерполяції стартує з шостого циклу, коли кількість валідних сусідів зменшується до трьох, і триває до повного зникнення пропущеного блоку. Такий підхід дозволяє досягти високої точності заповнення з мінімальними обчислювальними витратами.

Схема інформаційної системи демонструє в інтеграцію глобальної моделі моделі FourCastNet, яка використовує дані з GFS з асиміляцією GDAS як початкові умови, з модулем просторової інтерполяції на основі модифікованої архітектури UNet. У системі також враховано дані з локальних метеостанцій, що забезпечує додаткове уточнення прогнозу. Завдяки цьому архітектура орієнтована на оперативне отримання високоточних прогнозів у реальному часі, що є особливо актуальним для мобільних додатків, аграрного планування та систем раннього попередження про стихійні явища.

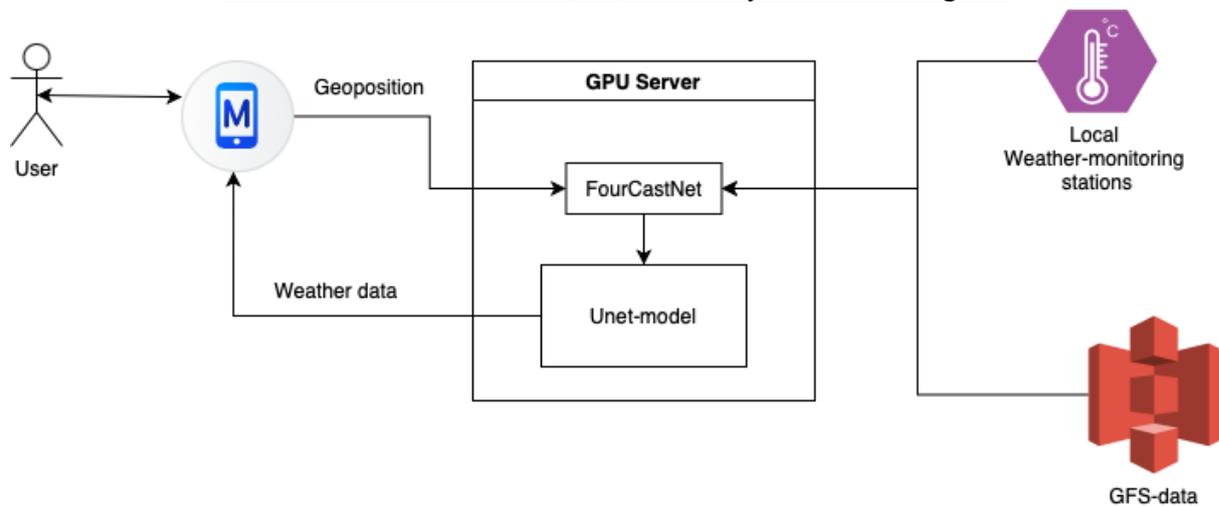


Рисунок 3 - Схема інформаційної системи

Користувач взаємодіє з системою через клієнтський застосунок (мобільний додаток чи веб застосунок). Комунікація відбувається шляхом передачі географічних координат в системі WGS 84 / Pseudo-Mercator EPSG:3857 через API Gateway на GPU server, де проводиться обробка погодніх даних. Після отримання координат система в асинхронному режимі запускає операцію прогнозування погоди, яка використовує глобальні метеорологічні данні. Після цього результат адаптується глобальний прогноз до локальних умов, враховуючи геопозицію користувача та дані з місцевих метеостанцій. Після завершення постобробки - дані в зручному форматі повертаються користувачу.

**Висновки.** В результаті досліджень було отримано інструмент прогнозування погоди в режимі реального часу з використання комбінації моделі глобального прогнозування FourCastNet та постропроцесінгу з використанням моделі Unet, для локалізації отриманого прогнозування та збільшення розподільної здатності прогнозу. В результаті експериментів було отримано середньоквадратичну похибку у 2 градуси, що дає змогу прогнозувати дані у режимі реального часу з відносно малим відхиленням. В результаті роботи було створено інформаційну систему з використанням для взаємодії з користувачем. Система також може бути імплементована як підмодуль існуючої системи моніторингу [10] якості повітря.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Lang S., Alexe M., Chantry M., Dramsch J. S., Pinault F., Raoult B. et al. (2024). AIFS - ECMWF's data-driven forecasting system. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.01465>
2. Waqas M., Humphries U. W., Chueasa B., Wangwongchai A. (2024). Artificial intelligence and numerical weather prediction models: A technical survey, *Natural Hazards Research*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.11.004>
3. Shabnam Kumari, P Muthulakshmi. (2023). Weather Prediction Using Futuristic Technologies: From Industry's Perspective. *In Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing (IC3-2023)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1145/3607947.3607994>

4. Pathak J., Subramanian S., Harrington P., Raja S., Chattopadhyay A., Mardani M., et al. (2022) FourCastNet: A Global Data-driven Weather Model using Deep Learning, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11214>
5. NVIDIA. FourCastNet – Forecasting Global Weather with Neural Operators [Електронний ресурс] // NVIDIA Documentation. – Режим доступу: [https://docs.nvidia.com/deeplearning/physicsnemo/physicsnemo-sym/user\\_guide/neural\\_operators/fourcastnet.html](https://docs.nvidia.com/deeplearning/physicsnemo/physicsnemo-sym/user_guide/neural_operators/fourcastnet.html).
6. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. (2020). Weather-Bench: A benchmark data set for data-driven weather forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, DOI: <https://doi.org/10.1029/2020MS002203>
7. National Center for Atmospheric Research. ERA5 Atmospheric Reanalysis [Електронний ресурс] // Climate Data Guide. – Режим доступу: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era5-atmospheric-reanalysis>.
8. Amazon Web Services. NOAA Global Forecast System (GFS) [Електронний ресурс] // Registry of Open Data on AWS. – Режим доступу: <https://registry.opendata.aws/noaa-gfs-bdp-pds/>. – Назва з екрана.
9. Wang, J. (2024) Data interpolation methods with the UNet-based model for weather forecast. *International Journal of Data Science and Analytics*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00611-z>
10. Molodets, B., Hnatushenko Volodymyr, Boldyriev D., Bulana T. Information System of Air Quality Assessment Based of Ground Stations and Meteorological Data Monitoring. *CEUR Workshop Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntellITSIS 2023)*. 2023.Vol. 3373, P. 206–216.

#### REFERENCES

1. Lang S., Alexe M., Chantry M., Dramsch J. S., Pinault F., Raoult B. et al. (2024). AIFS - ECMWF's data-driven forecasting system. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.01465>
2. Waqas M., Humphries U. W., Chueasa B., Wangwongchai A. (2024). Artificial intelligence and numerical weather prediction models: A technical survey, *Natural Hazards Research*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.11.004>
3. Shabnam Kumari, P Muthulakshmi. (2023). Weather Prediction Using Futuristic Technologies: From Industry's Perspective. *In Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing (IC3-2023)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1145/3607947.3607994>
4. Pathak J., Subramanian S., Harrington P., Raja S., Chattopadhyay A., Mardani M., et al. (2022) FourCastNet: A Global Data-driven Weather Model using Deep Learning, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11214>
5. NVIDIA. FourCastNet – Forecasting Global Weather with Neural Operators [NVIDIA Documentation.] Retrieved from [https://docs.nvidia.com/deeplearning/physicsnemo/physicsnemo-sym/user\\_guide/neural\\_operators/fourcastnet.html](https://docs.nvidia.com/deeplearning/physicsnemo/physicsnemo-sym/user_guide/neural_operators/fourcastnet.html).

6. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. (2020). Weather-Bench: A benchmark data set for data-driven weather forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, DOI: <https://doi.org/10.1029/2020MS002203>
7. National Center for Atmospheric Research. ERA5 Atmospheric Reanalysis [Climate Data Guide] Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era5-atmospheric-reanalysis>.
8. Amazon Web Services. NOAA Global Forecast System (GFS) [Registry of Open Data on AWS] Retrieved from <https://registry.opendata.aws/noaa-gfs-bdp-pds/>.
9. Wang, J. (2024) Data interpolation methods with the UNet-based model for weather forecast. *International Journal of Data Science and Analytics*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00611-z>
10. Molodets, B., Hnatushenko Volodymyr, Boldyriev D., Bulana T. Information System of Air Quality Assessment Based of Ground Stations and Meteorological Data Monitoring. *CEUR Workshop Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2023)*. 2023. Vol. 3373, P. 206–216. Mode of access: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/>

Received 02.05.2025.  
Accepted 13.05.2025.

### ***Analysis of existing architectures for the development of an information system of air quality assessment***

*The paper focuses on the development of information technology for weather modeling and forecasting using modern deep learning methods. The relevance of the topic is driven by growing climate risks, an increase in the frequency of extreme weather events, and the need for highly accurate meteorological analytics for the agricultural sector, transportation, energy, and civil defense systems. FourCastNet, a modern architecture based on deep neural networks and transformers that combines high performance with the ability to process large-scale historical meteorological data, was chosen as the main model for generating forecasts. FourCastNet was trained on data from global atmospheric analysis, which ensured forecasting accuracy at the same level with traditional numerical models at a much lower computational load.*

*To form the initial forecasting conditions, data from the GFS global numerical model in combination with the GDAS assimilation system were used. These sources provide weather data with a resolution of approximately  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~28 km), which made it possible to overcome the limitations of ERA5-type models (about 31 km) and make the system suitable for real-time use. In order to adapt the global forecast to a specific geographic location, a spatial interpolation approach was implemented using a modified UNet architecture. This model refines meteorological parameters based on data from local weather stations, thus improving the accuracy of forecasts at specific locations.*

*The article describes in detail the architecture of the information system, which includes modules for processing input data, forecasting models, an interpolation system, and an end-user interface. The proposed solution makes it possible to obtain highly accurate forecasts in an online mode, which is especially important for decision-making in critical industries. Particular attention is paid to the possibility of integrating the system into mobile applications and real-time notification platforms.*

*Keywords: information system, forecasting of atmospheric processes, meteorological data processing, neural networks, UNet architecture, FourCastNet model*

**Молодець Богдан Володимирович** – доцент кафедри інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії, доктор філософії в галузі інформаційних технологій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Булана Тетяна Михайлівна** – доцент кафедри інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії, кандидат технічних наук, Національний Технічний Університет «Дніпровська політехніка».

**Болдирєв Даниїл Олександрович** – аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

**Molodets Bohdan** – Associate Professor of the Department of information technology and computer engineering, Ph.D. in Software Engineering, Dnipro University of Technology.

**Bulana Tetiana** – Associate Professor of the Department of information technology and computer engineering, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Dnipro University of Technology.

**Boldyriev Daniil** – Postgraduate Student, Dnipro University of Technology.

## ANALYSIS OF SCIENTIFIC AND PRACTICAL ACHIEVEMENTS IN THE SPHERE OF REVERBERATION EFFECTS GENERATION

*Anotation. The study addresses the problem of creating realistic reverberation sound effects in computer games. The primary features of existing reverberation generation methods are outlined, including the complexity of manual sound parameter adjustments, the static nature of models, and limited adaptability to the geometry of the game environment. It was determined that the problem of creating realistic reverberation effects for computer games is achievable only when using modern approaches that reduce manual tuning and increase the adaptability of sound parameters. Based on the analysis, it was determined that there are significant obstacles that reduce the realism of acoustic accompaniment using available methods.*

*Keywords: reverberation, acoustic characteristics, procedural generation, machine learning, computer games.*

**Statement of the problem.** Interactive media, particularly computer games, are becoming integral to modern digital culture. Every year, the gaming industry demonstrates rapid growth in terms of the number of users and the complexity and realism of the products presented. One of the key elements of the success of modern games is the creation of a deep immersion of the user in the virtual environment, which is achieved through the complex integration of visual, audio, and interactive components.

Sound in computer games performs several important functions: it not only enhances the emotional impact on the player but also serves as a tool for communication with the game world, providing essential clues about events and actions of characters. One of the most important components of the audio system is the effects of reverberation - the phenomenon of multiple reflections of sound waves from surrounding objects. Reverberation creates a sense of volume and depth in the space in which the player is located and makes the sound environment more realistic and immersive.

In most modern games, the reverb effect is implemented using static algorithms based on predefined sound settings or templates. This approach, although it allows you to achieve high-quality sound, has a number of significant limitations. In particular, static reverb effects cannot adequately adapt to changes in the game space in real-time, which can reduce the realism of interaction with dynamic game environments. In large open worlds or complex architectural structures, this becomes especially noticeable when the player moves between different rooms or open spaces, where the acoustic properties of the environment change.

In this regard, there is a need to develop new approaches to generating sound effects that would allow for automatic and dynamic change of reverberation characteristics in accordance with the parameters of the environment.

**History of the development of approaches to creating reverberation effects.** Reverberation as an acoustic phenomenon has attracted the attention of scientists and engineers since long before the advent of digital technologies. Initially, reverberation was studied in the context of architectural acoustics for the design of concert halls, theaters, and churches. It affects how sound reflects off walls, ceilings, floors, and other surfaces and how this echo is perceived by the human ear. Important moments in the history of the development of approaches to reverberation are the emergence of both theoretical research and technological innovations that led to its integration into the digital audio industry.

**Early studies of reverberation.** The first systematic studies of reverberation in the framework of architectural acoustics were carried out as early as the 19th century. The pioneer in this field was the American physicist Wallace Clement Sabine [1], who in 1898 first formulated the basic principles of reverberation in architectural spaces. Sabine discovered the connection between the volume of the room, its surface, and how quickly the sound decays in the room after the source is turned off. His research became the basis for developing many architectural norms and approaches to the acoustic design of spaces. In the 20th century, with the advent of sound systems for cinemas, reverberation began to be actively used to improve sound perception in films and music. During this period, engineers began to experiment with electromechanical methods of reproducing reverberation, using large rooms or special reverberation chambers to provide natural echo for audio recordings [2].

**The beginning of the digital era: algorithmic reverberation methods.** With the advent of digital computers and audio technology in the 1960s and 1970s, there was a shift from physical models to digital ones. The first important step in this field was the development of digital algorithms for reverberation simulation. One of the first significant algorithms was proposed by M.R. Schroeder in 1961 [3]. Schroeder developed a digital reverberator based on a combination of finite impulse response (FIR) and infinite impulse response (IIR) filters, which allowed the creation of the first synthetic reverberation models suitable for use in audio systems.

Schroeder's algorithm was designed to create artificial reverberation using simple digital circuits that mimicked the process of sound decay in a room. This approach became the basis for the development of many future reverberators used in music and film. One of the key advantages of Schroeder's algorithms was that they required relatively few computational resources, which allowed for real-time reverberation on the computing devices available at the time.

**Physically based models.** Researchers have since developed more accurate, physically based models of reverberation. A significant advance in this direction has been using ray tracing and numerical methods to simulate the propagation of sound waves in environments with different acoustic properties. This approach has been particularly useful for modeling complex acoustic environments, such as theaters or open-air venues [4]. Some of the most influen-

tial works in this field include the work of Allen and Berkeley [5], who proposed the "mirror source" acoustic model method for calculating sound reflections in enclosed spaces. This method became the basis for further developments in the field of convolution reverberation, which allowed the use of real impulse responses of rooms to create the most realistic effects [6].

**Algorithmic reverberation and its role in the industry.** From the late 1980s to the present, digital reverb algorithms have become the standard in the audio industry. An important step was the emergence of software and hardware reverb solutions, such as the Lexicon and Eventide reverbs, which allowed musicians and sound engineers to create high-quality effects on studio equipment. Reverberators such as the Lexicon 480L, which entered the market in 1986, pioneered the application of digital reverb in practice. Using advanced Schroeder algorithms and other techniques, these devices allowed the creation of detailed and multi-layered reverb effects that are still used in the music industry today. These algorithms were especially useful for processing vocals, and instruments, and creating sound effects in film.

**Procedural reverberation and dynamic algorithms in games.** The recent development of computer games and interactive media has prompted researchers to search for new, more dynamic approaches to generating reverberation effects that could adapt to changes in the environment in real-time. In the 2000s, researchers such as Tsingos et al. (2007) proposed new dynamic reverberation methods that used ray tracing algorithms and voxel-based methods to accurately model sound reflections in complex environments.

Another important advance in procedural reverberation generation has been the use of path tracing methods, which allow for real-time simulation of sound reflections in interaction with the geometry of the environment. For example, [7] showed how voxel models can be used to simulate sound propagation in complex rooms, taking into account multiple reflections and attenuation.

Modern systems such as AudioKinetic Wwise and FMOD actively use these methods to provide realistic reverberation in games. However, the problems of computational resources and adaptation to real-time changes remain relevant, which encourages further development of procedural approaches.

**Classical reverberation methods.** Classical reverberation methods used before the advent of modern algorithms can be divided into several main categories, including mechanical, electronic, and digital approaches [8]. These methods have played an important role in creating realistic sound reproductions in music, film, and other audiovisual media. However, despite their importance, classical methods have their limitations, which has led to the need to develop new approaches.

**Mechanical Reverb.** Plate Reverb. One of the first methods of artificial reverberation to be widely used in studio recording was the plate reverberator. This method originated in the 1950s and involved the use of a thin metal plate on which transducers were placed. The plate was driven by an audio signal, creating complex vibrations that simulated the effect of reverberation. The signal was recorded by a microphone located at the other end of the plate.

Advantages:

– Plate reverberators provided rich, warm sound effects that were particularly valued in the music industry for vocals and instruments.

– Their design allowed for adjustable reverberation time, making them flexible for a variety of applications.

Disadvantages:

– High cost and bulkiness: such systems took up a lot of space in the studio and required special care.

– Unrealistic: Plate reverberation did not fully reproduce natural acoustic spaces, as its sound was too flat and did not contain enough high-frequency detail characteristic of real rooms.

**Spring Reverb.** Another classic mechanical method was the spring reverberator, often used in guitar amplifiers and portable sound systems. The sound signal was transmitted through a spring that vibrated, creating a reverberation effect.

Advantages:

– Compactness: Compared to plate reverberators, spring reverberators were significantly smaller and cheaper to manufacture.

– Relatively affordable for use on stage and in the studio.

Disadvantages:

– Poor sound quality: spring reverbs gave the reverb a characteristic "ringing" sound that didn't always sound natural.

– Limited control over reverberation parameters: Compared to other methods, spring reverbs had less controllable parameters, which limited their flexibility.

**Electronic Reverb.** With the development of electronics in the 1960s, external electronic reverberators such as the Lexicon 224 pioneered the field of artificial reverberation. These devices used digital processors to create a variety of reverberation effects, simulating the echoes of sound waves in different rooms.

Advantages:

– The ability to precisely adjust reverb parameters such as delay time, echo density, and brightness.

– Compact compared to mechanical systems.

– Rich functionality: electronic reverberators offered the ability to create a wide range of reverb effects.

Disadvantages:

– High cost of equipment in the early stages of development.

– Technological limitations: Early electronic reverbs had limited sound quality, especially compared to modern algorithms.

**Digital Reverb.** Algorithmic Reverb. In the 1970s and 1980s, digital reverberation became dominant due to the development of algorithms such as the Schroeder algorithm. These algorithms are based on digital signal processing, using mathematical models to simulate the behavior of sound in enclosed spaces. The main types of algorithms included convolution-based methods and infinite impulse response filters (IIR) [9].

Advantages:

- Flexibility: Digital algorithms allowed any type of room, from small rooms to large cathedrals, to be simulated by changing parameters using software.
- Real-time implementation: Digital processors allowed reverberation to be applied without significant delay, which was important for live performances and interactive applications such as computer games.
- Ability to integrate with other effects: Reverb algorithms could be easily combined with other digital effects, allowing the creation of multi-layered soundscapes.

Disadvantages:

- Early sound quality: Early digital reverbs did not always reproduce the natural behavior of sound. Their algorithms sometimes generated unrealistic or overly "metallic" echoes.
- High computational complexity: While modern processors are capable of handling complex algorithms, early versions required a lot of computational resources, which limited their use in real-time or on low-cost hardware.

Convolution Reverb. With the advent of more powerful computing systems, the convolutional reverberation method emerged, which allowed the use of real impulse responses to simulate the reverberation characteristics of specific rooms. This method consists of superimposing the recorded impulse response of the room onto the audio signal, which allows for a very accurate reproduction of the sound of a specific room.

Advantages:

- High realism: Convolutional reverberation allows for extremely accurate and natural results.
- Flexibility in room selection: Users can record impulse responses in any real space and use them to create the desired reverb effect.

Disadvantages:

- High computational complexity: Convolutional reverberation requires significant computational resources, especially for large impulse responses.
- Limited dynamics: Compared to algorithmic methods, convolutional reverberation is less flexible in adapting to real-time changes, making it less suitable for interactive applications such as computer games.

Classical reverberation methods, despite their importance, had a number of limitations that necessitated their improvement or replacement with new technologies.

**Procedural generation of reverberation effects: modern scientific developments.**

Procedural generation of reverberation effects has become an important research area in the field of sound processing with the advent of modern algorithms and increasing demands for sound quality and realism in interactive environments such as computer games, virtual reality (VR), and augmented reality (AR) [10]. Compared to classical methods with limited capabilities in reproducing realistic spaces, procedural generation offers more flexible and adaptive approaches that allow for the dynamic generation of reverberation effects in real-time.

**Algorithmic approaches and physically based models.** One of the key directions in procedural reverberation generation is the development of algorithmic approaches based on physical models of acoustic spaces. Current scientific developments in this area focus on simulating sound waves' complex interactions with spatial boundaries, such as walls, floors, and ceilings, using accurate mathematical models [11].

**Ray Tracing.** One of the most common methods for modeling acoustic spaces is the ray tracing method [12]. This approach allows you to track the paths of sound waves as they reflect from different surfaces in a room. In computer games and VR environments, this method can be used to create realistic reverberation effects that change depending on the location of the object or the user.

Advantages:

- **Realism:** The method allows for accurate reproduction of the behavior of sound waves in complex spaces, especially in large architectural structures such as cathedrals, concert halls, or tunnels.

- **Dynamics:** Ray tracing can be applied in real-time, allowing the reverberation to adapt to changes in the scene, such as the movement of objects or changes in the configuration of the room.

Disadvantages:

- **High computational cost:** This method requires significant computational resources to track the trajectories of numerous sound beams accurately. Although modern computing systems are capable of handling this task, optimization of the algorithms is required for interactive applications.

**Diffusion-based Models.** Another popular method is diffusion-based models, which simulate reverberation in enclosed spaces with complex, uneven surfaces. These models simulate the scattering of sound waves after multiple reflections, allowing for more realistic effects for sound scenes [13].

Advantages:

- Ability to model complex environments, including rooms with soft or uneven surfaces.

- Ability to precisely control sound propagation and energy dissipation in a room.

Disadvantages:

- Difficulty in real-time implementation due to computational costs.

**Procedural approaches to generating sound environments.** Current research also aims to develop procedural methods that allow for the automatic generation of reverberation parameters based on room geometry. Such methods are particularly relevant for interactive environments where space structure can change in real-time (for example, in computer games).

**Voxel-based Sound Propagation** is an innovative approach to the procedural generation of reverberation effects, where space is divided into voxels (three-dimensional pixels), each of which is responsible for a particular part of the space. Sound waves are modeled as propagat-

ing through these voxels, which allows for the creation of detailed and realistic sound environments that adapt to changes in space.

Advantages:

- Ability to realistically simulate sound environments with various obstacles and objects.
- Adaptation to dynamic changes in space in real-time, making this approach ideal for computer games and VR.

Disadvantages:

- High computational resource requirements for accurate simulation of large spaces.
- The need for accurate voxel mesh definition for efficient simulation.

**Modern scientific achievements.** Today, the development of the procedural generation of reverberation effects is intensive and multifaceted. Many companies and research institutes focus on combining physical models, algorithmic approaches, and machine learning to create realistic, interactive, and high-quality reverberation effects [14].

Machine learning and neural networks. Recently, the scientific community has been working on the application of neural networks to simulate reverberation effects. Such models are able to learn from large data sets and generate reverberation that corresponds to real acoustic conditions. One direction is the use of convolutional neural networks to process impulse responses and create realistic reverberation.

Real-time impulse reverberation. While convolutional reverberation has long been used to create realistic acoustic environments, new research is focusing on optimizing it for real-time use. The introduction of optimization techniques allows impulse reverberation to be used even in interactive applications with high frame rates.

Despite significant progress in the development of procedural generation of reverberation effects, current approaches have a number of challenges that require further research. For example, the main problem remains in optimizing computational processes to implement high-quality reverberation in real-time. Other challenges include the need to adapt models to specific environments and usage scenarios, such as computer games with high performance and graphics requirements. Machine learning and hybrid approaches may become key tools to overcome these limitations in the future.

**Comparison of global and domestic achievements in the field of audio technologies.** Audio technologies, particularly reverberation effects, occupy an essential place in the modern entertainment industry, and developments in this area are carried out globally and domestically. Comparison of achievements allows us to assess the place of domestic innovations in the global context and determine their potential for further development [15].

Western companies and scientific institutes are actively developing innovative technologies for the simulation of reverberation and sound environments. In particular, corporations such as Waves Audio, iZotope, and Avid are leaders in creating professional audio tools for the music industry, cinema, and computer games. The main areas of their research are the development of algorithms to improve the realism of sound effects and the integration of machine learning to improve the quality of sound simulation [16].

One of the most significant world achievements is the development of convolution reverb, which allows you to create virtual acoustic environments based on the impulse characteristics of real rooms. This technology has become an integral part of audio production in various industries due to its ability to convey spatial sound effects realistically. In addition, in the field of interactive applications, such as virtual reality (VR) and augmented reality (AR), procedural acoustic modeling methods are actively used, allowing you to adapt reverberation effects to dynamic changes in the scene.

Realistic reverberation technologies for games are also being actively developed around the world. Companies such as Epic Games and Unity Technologies [17] are integrating advanced audio solutions, such as ray tracing techniques for acoustic environments, into their game engines, allowing for effects that are as close to real-world conditions as possible.

In Ukraine, the development of audio technologies, especially in reverberation, also has its achievements, although the domestic industry is smaller in scale compared to world leaders. However, several domestic research centers and universities are actively working on new approaches to sound processing. For example, the institutes of Taras Shevchenko National University of Kyiv and the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" are researching methods of sound synthesis and processing for interactive environments and multimedia systems. It is especially worth noting the contribution of Ukrainian developers in the field of audio technologies for music applications. For example, the Ukrainian company Warm Audio, which is engaged in creating high-quality analog audio devices, has received international recognition. Although domestic companies mainly focus on hardware, there are also innovative attempts to create software solutions, in particular in the gaming industry, where Ukrainian studios often work on integrating audio technologies into modern game engines.

The global audio industry is characterized by a greater diversity of research and innovation due to access to greater financial resources and an advanced technical base. Companies in Europe, the USA, and Japan can invest in the development of algorithms and use high-performance computing systems to simulate sound effects in real-time. At the same time, domestic developments have potential, especially in integrating audio processing with low computational costs, which is relevant for small game studios and startups.

However, Ukraine still has to overcome a number of challenges to reach the world level. These include insufficient research funding, limited opportunities for implementing complex algorithms in the industry, and the lack of wide access to modern hardware for simulating reverberation effects.

**Analysis of similar solutions on the market.** The market for audio processing, particularly reverberation effects, is actively developing and offers a variety of software and hardware solutions for professionals in the music industry, film, computer games, and other areas where a realistic sound stage is a key component. Analysis of existing products on the market allows us to identify the advantages and disadvantages of modern technologies, determine their competitiveness and opportunities for improvement [18].

**Software solutions.** Among the software for creating and processing reverberation, several key products can be distinguished that occupy leading positions in the market.

1) Waves Audio – Abbey Road Reverb Plates

This plugin emulates the classic reverb plates used in the legendary Abbey Road studios. The plugin allows users to adjust reverb parameters, creating warm and deep effects for vocals and instrumental recordings.

Advantages:

- Realistic reproduction of vintage sound, ideal for the music industry.
- Numerous settings allow you to precisely select reverb parameters for different genres of music.

Disadvantages:

- Limited use in interactive environments such as games or VR due to the specificity of reverberation effects.

2) iZotope – Neoverb

Neoverb from iZotope is one of the most innovative solutions on the market, using artificial intelligence to automatically adjust reverb parameters based on audio content. This tool allows you to quickly obtain high-quality reverb effects, focusing on the characteristics of the input sound.

Advantages:

- Use of artificial intelligence to optimize parameters, which greatly simplifies the sound processing process.
- High-quality reverberation with minimal settings, which saves time.

Disadvantages:

- High license cost for small studios or individual users.

3) Valhalla DSP – ValhallaRoom

ValhallaRoom is one of the most popular reverb plugins due to its ease of use and efficiency. It allows you to create reverb that can be customized for different types of rooms - from small studios to large concert halls.

Advantages:

- High performance with low system resource requirements.
- Extensive customization options and affordable prices make it popular among indie developers and small studios.

Disadvantages:

- Lack of advanced capabilities such as artificial intelligence or realistic modeling of complex spaces, which limits use in high-budget projects.

**Hardware solutions.** In addition to software tools, there are also hardware solutions on the market that allow you to implement reverb effects.

1) Lexicon PCM92

Lexicon is a legendary manufacturer of hardware reverbs, providing exceptional sound quality used in the music and film industries. The PCM92 is one of the leading solutions for

creating realistic reverb effects thanks to advanced algorithms and high-quality sound processing.

Advantages:

- High sound quality and the ability to adjust reverberation for large acoustic spaces.
- Reliability and stability of operation, which is important for large studios and concert venues.

venues.

Disadvantages:

- High cost makes this device inaccessible to individual users or small studios.

## 2) Bricasti M7

Another well-known hardware reverb is the Bricasti M7. It is used in many leading studios to create high-quality reverb effects, including in the film industry and for music recording.

Advantages:

– Advanced sound processing technology with the ability to simulate various types of reverberation.

- High accuracy and realism of reverb effects.

Disadvantages:

– Like the Lexicon PCM92, the device is expensive and more suitable for large studios than for individual use.

The global market offers a wide range of solutions for creating reverb effects, from software products aimed at various audio industries to professional hardware. Software plugins such as ValhallaRoom are affordable and offer a sufficient level of flexibility for small projects, while more advanced solutions from iZotope or Lexicon provide the highest quality but require a significant financial investment.

There is also interest in creating software solutions for reverberation in the Ukrainian market, but these products are often focused on budget options or narrowly specialized tasks, such as music production, with less attention to interactive environments, such as game engines.

**Conclusions.** Despite significant progress in the development of audio technologies and the creation of reverberation effects, there are a number of unresolved problems that require further research and improvement. They are concerned with both optimizing technologies for interactive environments and improving sound quality under conditions of limited computing resources [19].

### 1) Computational complexity of reverberation algorithms

One of the main problems remains the high computational complexity of current reverberation algorithms, especially when simulating realistic acoustic environments in real-time. Procedural methods such as ray tracing for acoustic effects or convolutional reverberation require significant CPU and memory resources, which is problematic for interactive applications such as computer games or virtual reality (VR).

Research area: further improvement of procedural algorithms for reverberation, in particular by implementing machine learning methods to reduce computational requirements and improve real-time efficiency.

#### 2) Reverb quality in dynamic environments

Another essential problem is to provide realistic reverberation in dynamic environments, where the acoustics change depending on the position of objects, changes in the room, or the movement of sound sources. Although modern reverberation plugins allow for accurate simulation of reverberation for static rooms, the technology still needs improvement for dynamic scenarios such as virtual environments or games.

Research area: development of adaptive reverberation methods that automatically adjust to changes in the acoustic environment in real-time, taking into account the movement of objects and changes in spatial parameters.

#### 3) Integration with game engines and VR environments

Although many software solutions for reverberation exist in the music and film industries, integrating these technologies with game engines such as Unity or Unreal Engine is still challenging. Creating realistic reverberation in games requires accurate sound modeling and optimization to work on a wide range of devices, including mobile platforms.

Research area: Research on optimized reverberation algorithms for integration into game engines, with a particular focus on efficiency for mobile platforms and systems with limited resources.

#### 4) Reverb for immersive technologies

With the development of immersive technologies such as augmented reality (AR) and virtual reality (VR), there is a need for even more realistic reproduction of acoustic effects that change according to the user's or objects' movement in the virtual environment. Traditional reverberation algorithms do not always provide the necessary level of realism for such scenarios [20].

Research area: development of new reverberation methods for AR and VR that will take into account the position and movement of the user in the virtual space to create a full immersion effect.

#### 5) Reverberation effect on sound perception

Reverberation is an essential factor in the perception of soundstage and spatial sensation, but its impact on the audiopsychological perception of listeners has not yet been thoroughly studied. Different types of reverberation can affect the perception of space, time, and sound timbre in various ways, especially in interactive media.

Research area: conducting experimental studies on the impact of different types of reverberation on the psychoacoustic perception of the sound environment and integrating the results into the creation of new algorithms.

#### 6) Acoustic ecology

Another challenge is the application of reverberation technologies to improve acoustic conditions in public spaces, such as concert halls, offices, or shopping malls. Modeling the acoustics of such environments requires special attention to detailing the reverberation effects to ensure comfortable sound perception.

Research area: studying reverberation methods to improve the acoustic characteristics of large spaces, in particular public spaces, to create acoustically pleasant environments.

#### LITERATURE/ REFERENCES

1. P. Doyle, *Echo and Reverb: Fabricating Space in Popular Music Recording, 1900–1960*. By Peter Doyle., т. 88, Middletown, CT: Wesleyan University Press, 2005, pp. 379-382.
2. L. L. Beranek, *Acoustics*, New York: Acoustic Society of America, 1954.
3. M. R. Schroeder, «Natural sounding artificial reverberation» *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 10, № 3, pp. 219-223, 1962.
4. J. D. Polack, «Modifying the Decay Rate of Reverberation in Room Acoustics» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, № 3, pp. 1057-1066, 1988.
5. J. B. Allen and D. A. Berkley, «Image method for efficiently simulating small-room acoustics» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 65, № 4, pp. 943-950, 1979.
6. B. Blesser, «Audio rendering: An overview of approaches to physically modeling the acoustics of spaces.,» *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 49, № 7/8, pp. 534-554, 2001.
7. N. Raghuvanshi, N. Rahul and M. C. Lin, «Efficient and accurate sound propagation using adaptive rectangular decomposition» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 15, № 5, pp. 789-801, 2009.
8. J. A. Moorer, «About this reverberation business» *Computer Music Journal*, vol. 3, pp. 13-28, 1979.
9. M. & J. H. Karjalainen, «Reverberation modeling using digital signal processing techniques» in *AES Convention, Amsterdam*, 2001.
10. N. Tsingos, E. Gallo and G. Drettakis, «Perceptual audio rendering of complex virtual environments» *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 23, № 3, pp. 249-258, 2004.
11. N. Tsingos, E. Gallo and G. Drettakis, «Parametric wave field coding for precomputed sound propagation» *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 33, № 4, pp. 1-11, 2014.
12. L. Savioja and P. U. Svensson, «Overview of geometrical room acoustic modeling techniques» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 138, № 2, pp. 708-730, 2015.
13. J. Reiss and A. McPherson, *Audio Effects: Theory, Implementation and Application.*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
14. T. Lentz, «Virtual acoustics based on the wave equation: Echoes, late reverberation, and listening tests.,» *AES Journal*, vol. 55, № 9, pp. 723-740, 2007.
15. M. Vorländer, *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality.*, Heidelberg: Springer Berlin, 2008.
16. K. & M. P. Misztal, «Current State of Research in Audio Signal Processing» *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 66, № 5, pp. 401-415, 2018.
17. G. Somberg, *Game Audio Programming: Principles and Practices.*, Boca Raton: CRC Press, 2016.
18. T. Carpentier and O. Warusfel, «A Review of 3D Audio Techniques for Sound Design and Game Audio Applications» in *AES Conference: 147th International Audio Engineering Society Convention.*, Amsterdam, 2020.

19. N. Tsingos, T. Funkhouser, A. Ngan and I. Carlbom, «Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction» ACM Transactions on Graphics, vol. 20, № 2, pp. 187-194, 2001.
20. B. C. J. Moore, An Introduction to the Psychology of Hearing. 6th ed., Bingley: Emerald Group Publishing, 2012.

Received 02.05.2025.  
Accepted 13.05.2025.

***Аналіз наукових і практичних досягнень  
у сфері генерації ревербераційних ефектів***

*У роботі розглянуто проблему створення реалістичних звукових ефектів реверберації в комп'ютерних іграх. Показано основні особливості існуючих методів генерації реверберації, серед яких складність ручної обробки параметрів звуку, статичність моделей та обмежена адаптивність до геометрії ігрового простору. Визначено, що проблема створення реалістичних ревербераційних ефектів для комп'ютерних ігор є досяжною лише при застосуванні сучасних підходів, що зменшують ручне налаштування та підвищують адаптивність звукових параметрів. На підставі аналізу визначено, що існують значні перешкоди, які знижують реалістичність акустичного супроводу доступними методами.*

*Ключові слова: реверберація, акустичні характеристики, процедурна генерація, машинне навчання, комп'ютерні ігри.*

**Зародюк Антон Володимирович** – старший ігровий програміст, ТОВ “Gunzilla Games”.

**Ліхоузова Тетяна Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Zarodiuk Anton** – Senior Gameplay Programmer, Gunzilla Games LLC.

**Likhouzova Tetiana** – Ph.D., Associate Professor, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

О.Д. Клименко

## ПЕРЕВІРКА ОДНОРІДНОСТІ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ВИБІРОК КРИТЕРІЯМИ АНДЕРСОНА ТА БУША-ВІНДА

*Анотація. Дослідження статистичної однорідності вибірок є важливим завданням у математичній статистиці, оскільки воно дозволяє оцінювати достовірність експериментальних вимірювань та визначати, чи належать вони до однієї генеральної сукупності. У цій статті розглянуто два підходи до перевірки статистичної однорідності вибірок: двох вибіркової критерій Андерсона та комбінований критерій Буша-Вінда. Кожен із цих критеріїв має свої особливості, сфери застосування та ефективність залежно від розміру вибірок та розподілу ймовірності, що аналізуються. Мета дослідження: оцінка ефективності двох підходів до перевірки статистичної однорідності вибірок: двох вибіркового критерію Андерсона та комбінованого критерію Буша-Вінда, а також визначення впливу розміру вибірок та статистичних параметрів псевдовипадкових величин, визначені недоліки та переваги використання цих критеріїв. Методи дослідження: у дослідженні розглядаються критерії перевірки однорідності псевдовипадкових величин: двох вибіркової критерій Андерсона та комбінований критерій Буша-Вінда, за допомогою яких визначається однорідність псевдовипадкових вибірок в умовах невідомих статистичних параметрів (розподілу ймовірності, математичного очікування, дисперсії). Наукова новизна дослідження: визначено, що, якщо вибірки у дослідженні,  $n \leq 100$ , то критерій Андерсона є більш надійним для аналізу псевдовипадкових величин із невідомими статистичними параметрами, так як він демонструє вищу стійкість до аномалій, у порівнянні з комбінованим критерієм Буша-Вінда. Визначено, що при дослідженні малих вибірок ( $n=20 \div 40$ ) обидва критерія показують високу ймовірність прийняття правильного рішення при аналізі псевдовипадкових величин на однорідність з різними статистичними параметрами. Практична новизна дослідження: для аналізу випадкових величин з невідомими статистичними параметрами для коротких вибірок запропоновано використовувати двох вибіркової критерій Андерсона та комбінований критерій Буша-Вінда, але для підвищення надійності результатів при дослідженні, в умовах забруднення, доцільно комбінувати статистичні критерії з методами очищення даних або використовувати робастні аналоги. Сфери застосування: дослідження може бути використане в галузях, де необхідно оцінювати статистичну однорідність вибірок, зокрема в експериментальних науках, соціології, медицині та інженерії, для оцінки якості вимірювань та виявлення можливих відхилень у даних.*

*Ключові слова: математична статистика, метод, вибірка, розподіл ймовірності, критерій Андерсона, критерій Буша-Вінда.*

**Вступ.** Дослідження статистичної однорідності вибірок є важливим завданням у математичній статистиці, оскільки воно дозволяє оцінювати достовірність експериментальних вимірювань та визначати, чи належать вони до однієї генеральної сукупності. У цій статті розглянуто два підходи до перевірки статистичної однорідності вибірок: двохвибірковий критерій Андерсона та комбінований критерій Буша-Вінда. Кожен із цих критеріїв має свої особливості, сфери застосування та ефективність залежно від специфіки вибірок, що аналізуються. Двох вибірковий критерій Андерсона широко використовується для оцінки статистичної однорідності вибірок, отриманих у ході експериментальних досліджень з невідомими статистичними параметрами. Методологія цього підходу базується на порівнянні упорядкованих значень вибірок та їх об'єднаних рангових характеристик. Завдяки цьому критерію можна робити висновки про рівномірний розподіл даних у вибірках та їхню взаємну відповідність. Важливо зазначити, що ефективність цього критерію значно зростає при достатньо великій кількості спостережень у вибірках. Комбінований критерій Буша-Вінда базується на використанні логістичних випадкових величин та є аналогом статистик Ван-дер-Вардена і Клотца. Він дозволяє оцінювати вибірки з невідомими статистичними закономірностями, що робить його універсальним засобом для аналізу експериментальних вимірювань. Однією з ключових переваг цього критерію є його здатність враховувати як відхилення у середніх значеннях вибірок, так і варіації у їхній дисперсії. Це дозволяє отримати більш точні результати при аналізі вибірок, які можуть мати суттєві відмінності у своїх параметрах. Критерій Буша-Вінда використовується у випадках, коли стандартні методи перевірки статистичної однорідності дають неоднозначні результати або не враховують всіх можливих відхилень у вибірках [1-7]. Проведемо дослідження щодо перевірки однорідності вибірок випадкових величин за двома критеріями.

**Теоретичні основи критерію Андерсона.** Критерій Андерсона широко застосовується під час перевірки статистичної однорідності вибірок експериментальних вимірів з невідомими функціями розподілу ймовірності. Цей критерій, що формується за рангами впорядкованих вибірок  $X_1^*(k)$  та  $X_2^*(k)$ , а також їх об'єднаної вибірки  $X_{12}^*(i)$ , де  $i = 1, 2, \dots, 2n$ ,  $X_{12}^*(i) = X_1^*(k) + X_1^*(k - n)$ ,  $X_{21}^*(i) = X_2^*(k) + X_2^*(k - n)$ . Ранги визначаються за формулами

$$R(X_1^*(k)) = \sum_{k=1}^{2n} (X_1^*(k) - X_{12}^*(k)), \quad R(X_2^*(k)) = \sum_{k=1}^{2n} (X_2^*(k) - X_{21}^*(k)).$$

де  $\text{sgn}(x - a)$  – функція одиничного стрибка, що дорівнює одиниці, якщо  $x \geq a$ , та нулю, якщо  $x < a$ .

Критерій Андерсона описується формулою

$$V_1(n) = \frac{1}{2n^2} \left[ \sum_{k=1}^n (R(X_1^*(k)) - k)^2 + (R(X_2^*(k)) - k)^2 \right] - \frac{4n^2 - 1}{12n},$$

Це випадкові величини та їх статистичні закономірності при  $n \geq 40$  схожі на розподіл Смирнова-Крамера-фон-Мізеса [1]. Якщо вибірки короткі і статистично однорідні, то з ймовірністю 0,95 критерій Андерсона  $V_1(n) \leq V_{0.1}(n)$  менше критичного значення

$$V_{0.1}(n) = \left( 0,4614 - \frac{0,4}{n} - \frac{0,6}{n^2} \right) \left( 1 + \frac{1}{n} \right).$$

Якщо виконується ця нерівність, то приймається рішення про однорідність досліджуваних вибірок.

**Теоретичні основи комбінованого критерію Буша-Вінда.** Якщо дві вибірки  $X_1(k)$  і  $X_2(k)$  можуть змінюватися математичні очікування і дисперсії, зрушення і масштаби, то передбачається перевірити їх статистичну однорідність, використовуючи комбінований критерій Буша-Вінда. Класична математична статистика цей критерій апроксимує стандартних нормальних випадкових величин [2-4]. Замінімо їх логістичними випадковими величинами – функцією  $F(x)$  та зворотною функцією  $U(x)$ .

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\pi}{\sqrt{3}}x\right)},$$

$$U(x) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left( \ln(F(x)) - \ln(1 - F(x)) \right).$$

Критерій Буша-Вінда формується на статистиці, еквівалентній статистиці Вандер-Вардена та Клотца [1, 2]. Досліджуються дві вибірки  $X_1(k)$  і  $X_2(k)$  з невідомими статистичними закономірностями. Формується об'єднана вибірка  $X_{12}(k)$  за формулою

$$X_{12}(k) = X(i/2) + X(i - n/2), i = 1, 2, \dots, 2n,$$

де  $X(i/2) = X_1(k)$ ,  $X_1(i) = 0, i > 0$ ;  $X(i/2) = X_2(i - n)$ ,  $i > n$ ,  $X_2(i) = 0, i < n$ .

Визначимо ранги  $X_{12}(k)$

$$R(X_{12}(k)) = \sum_{i=1}^n \operatorname{sgn}(X_{12}(k) - X_{12}(i)).$$

Використовуючи ранги, перетворимо вибірку  $X_{12}(i)$  на впорядковану вибірку

$$X_{12}^*(i) = X_{12}(k) \sum_{k=1}^{2n} \left( \operatorname{sgn}(i - R(X_{12}(k))) + \operatorname{sgn}(i - 1 - R(X_{12}(k))) \right),$$

Ранги впорядкованої вибірки  $R(X_{12}^*(i))$  відомі, це їх номери  $i = 1, 2, \dots, 2n$ . Для розуміння розглянемо дві впорядковані вибірки

$$X_{12}^*(i/1) = 2, 1; 3, 2; 4, 8; 5, 7; 8, 1; 9, 2; 12, 4.$$

$$X_{12}^*(i/2) = 0,8; 0,9; 2,6; 4,3; 7,3; 8; 9,4; X_2(i) = 12,7.$$

Сформуємо за ними одну сумарну впорядковану вибірку  $X_{12}^*(i/1)$  та її ранги (табл.1).

Таблиця 1

$X_{12}^*(i)$	0,8	0,9	2,1	2,6	3,2	4,3	4,8	5,7	7,3	8,1	9,2	9,4	12,4	12,7
$R(X_{12}^*(i))$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

У тому числі ранги вибірок  $X_{12}^*(i/1) = X_1^*$ ,  $X_{12}^*(i/2) = X_2^*$ . Їх ранги  $R(X_{12}^*(i/1))$  та  $R(X_{12}^*(i/2))$  представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

$R(X_{12}^*(i/1))$	3	5	7	8	10	11	13
$R(X_{12}^*(i/2))$	1	2	4	6	9	12	14

Ранги  $R(X_{12}^*(i/1))$  використовуються для оцінки критерію Буша-Вінда. За ними спочатку визначаються показники, еквівалентні критеріям Ван-дер-Вардена  $S(X_{12}^*(i/1))$  і Клотца  $T(X_{12}^*(i/1))$  логістичним функціям

$$U\left(\frac{k}{2n+1}\right) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{k}{2n+1}\right) - \ln\left(1 - \frac{k}{2n+1}\right) \right],$$

$$U\left(\frac{R(X_1^*(k))}{2n+1}\right) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{R(X_1^*(k))}{2n+1}\right) - \ln\left(1 - \frac{R(X_1^*(k))}{2n+1}\right) \right].$$

Аналоги критеріїв Ван-дер-Вардена та Клотца визначаються за вибіркою  $X_{12}^*(k/1) = X_1^*(k), k = 1, 2, \dots, n$

$$S(X_{12}^*) = \frac{\sqrt{\frac{2n-1}{n^2} \sum_{k=1}^n U\left(\frac{R(X_{12}^*(i/1))}{n+1}\right)}}{\sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} U^2\left(\frac{k}{2n}\right)}},$$

$$T(X_{12}^*) = \frac{\sqrt{\frac{2n-1}{n^2} \sum_{k=1}^n U^2\left(\frac{R(X_{12}^*(k/1))}{n+1}\right) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n U^2\left(\frac{k}{2n}\right)}}{\sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} U^2\left(\frac{k}{2n}\right)}}.$$

Це випадкові величини вибірок  $S(X_{12}^*)$  та  $T(X_{12}^*)$ .

Критерії Буша-Вінда визначається за цими показниками  $S(X_{12}^*) = S_{12}^*$  та  $T(X_{12}^*) = T_{12}^*$ . Класична математична статистика розглядає їх як стандартні нормальні випадкові величини та описується їх апроксимаціями. Замінімо такий опис статистики стандартною логістичною функцією розподілу ймовірності

$$F(S_{12}^*) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\pi}{\sqrt{3}}S_{12}^*\right)}, \quad F(T_{12}^*) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\pi}{\sqrt{3}}T_{12}^*\right)}.$$

Формула критерію Буша-Вінда визначається за модулями  $|S_{12}^*|$  і  $|T_{12}^*|$

$$V_3 = -2\ln\left(2(1 - F(|S_{12}^*|))\right) - 2\ln\left(2(1 - F(|T_{12}^*|))\right).$$

Це випадкові величини і з ймовірністю  $P = 0,95$  їх значення порівнюються з граничними значеннями  $V_0(n)$ , які представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

$n$	5	10	15	20	30	40
$V_0(n)$	7,92	8,65	8,97	9,05	9,24	9,30

**Перевірка однорідності псевдовипадкових вибірок критеріями Андерсона та Буша-Вінда.** Для проведення дослідження скористуємося двома гіпотезами. Перша гіпотеза: нульова гіпотеза ( $H_0$ ) – вибірки  $X_1$  та  $X_2$  походять з одного й того ж розподілу, тобто  $X_1$  та  $X_2$  описуються нормальним розподілом з параметрами математичного очікування -нуль ( $M[X]=0$ ), дисперсією одиниця ( $D[X]=1$ ). Друга – альтернативна гіпотеза ( $H_1$ ) – вибірки  $X_1$  та  $X_2$  походять із різних розподілів ймовірності. У якості вибірки  $X_1$  – будемо використовувати вибірку псевдовипадкових величин, що описуються нормальним розподілом ймовірності, а у якості вибірки  $X_2$  будемо використовувати вибірки Тьюкі з статистичними параметрами ( $M[X]=1$ ,  $D[X]=1$ ). Забруднені вибірки Тьюкі – це тип вибірок, у яких деяка частина даних походить від іншого розподілу (або з іншими параметрами) й порушує початкові припущення щодо однорідності вибірки. Термін "забруднення" часто використовується в контексті статистичних досліджень для позначення ситуації, коли в дані вибірки додаються спостереження, що відрізняються за розподілом від основної частини вибірки. Це може бути результатом помилок вимірювань, непередбачених зовнішніх факторів або неконтрольованих варіацій у даних. Забруднені вибірки Тьюкі – це певний тип забруднення даних, яке впливає на застосування статистичних методів для перевірки гіпотез, особливо при перевірці однорідності вибірок. Забруднення можуть виникати на будь-якому етапі роботи з даними. Їх своєчасне виявлення та корекція критично важливі для отримання вірних результатів. Використання якісного експерименту і суворих методів аналізу допомагає мінімізувати ризики у будь-якій галузі знань (соціальних, біологічних, медичних, тощо) [1, 7]. Проведемо дослідження та визначимо однорідність за допомогою Критерію Андерсона та Буша-Вінда За гіпотезами  $H_0$  та ( $H_1$ ) стверджується, що критерії Андерсона та Буша-Вінда не повинні реагувати на порівняння вибірок з різними видами забруднення (стрибки, викиди, помилки вимірювання, зміщення вибірки, пропущені дані, дублювання даних, шум у даних). Для перевірки гіпотез, першу вибірку будемо формувати з нормальним законом розподілу з статистичними параметрами:  $M[X_1]=0$ ,  $D[X_1]=1$ , а другу будемо моделювати за вибіркою Тьюкі, з параметрами

$M[X_2]=0$ ,  $D[X_2]=1$ . Тобто, забруднення вибірки  $X_2$  призводить до зміни її статистичних параметрів, оскільки вона більше не буде мати нормального розподілу. Проведемо дослідження псевдовипадкових величин на різних за розміром вибірках  $n=5,10,15,20,25,30,40,50,100$ , де  $n$  – кількість елементів у вибірці. На рис. 1 – рис.4. представлені гістограми двох вибірок: перша – з нормальним розподілом ймовірності та друга – з різним відсотком забруднення (вибірка Тьюкі), а також наведено ймовірність прийняття рішення нульової гіпотези.

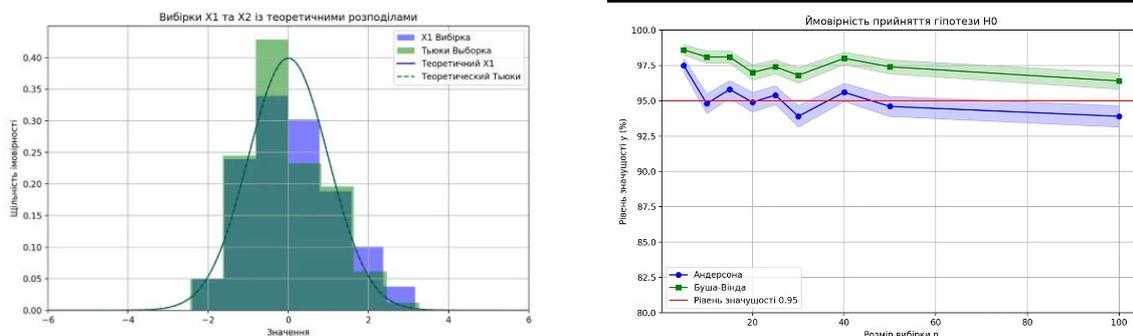


Рисунок 1 - Гістограма та ймовірність прийняття рішення щодо нульової гіпотези за відсутності внесення забруднення у вибірки ( забруднення – 0%)

За результатом дослідження (рис.1) отримано, що ймовірність прийняття нульової гіпотези (при  $P=0,95$ ) дуже висока і складає 0,94% за критерієм Андерсона, та за критерієм Буша Вінда – 97%. Це можна пояснити тим, що критерій Андерсона особливо чутливий. В даному випадку використовувалися псевдовипадкові вибірки з однаковими статистичними параметрами:  $M[X]=0$ ,  $D[X]=1$ . На рис. 2 представлені гістограми двох вибірок: перша – з нормальним законом розподілу ймовірності та друга вибірка Тьюкі (на 5 % забруднена) зі статистичними параметрами  $M[X_2]=1$  та  $D[X_2]=1$ .

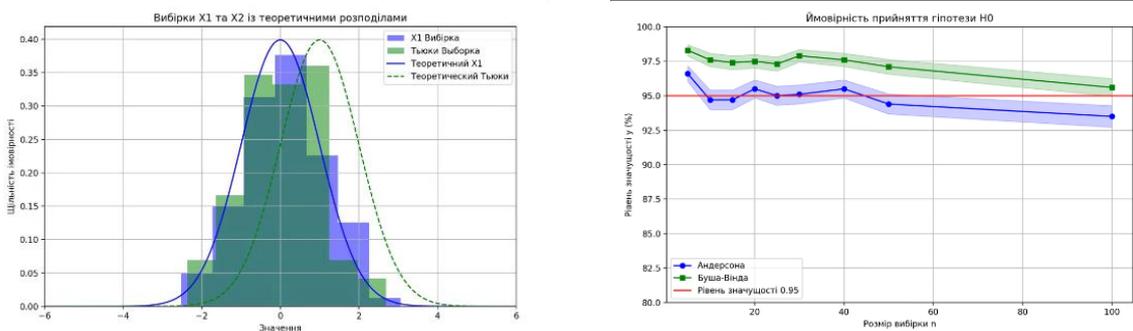


Рисунок 2 - Гістограма та ймовірність прийняття рішення щодо нульової гіпотези з внесенням забруднення у другу вибірку ( забруднення – 5%)

На рис. 3 та рис. 4: представлено дослідження, з урахуванням того, що перша вибірка має нормальний закон розподілу, а друга – забруднена та складає 15% та 20% відповідно.

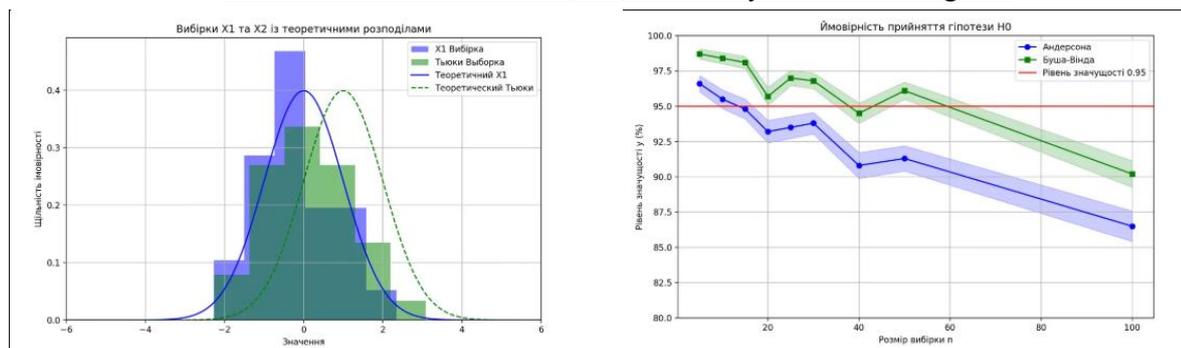


Рисунок 3 - Гістограма та ймовірність прийняття рішення щодо нульової гіпотези з внесенням забруднення у другу вибірку ( забруднення – 15%)

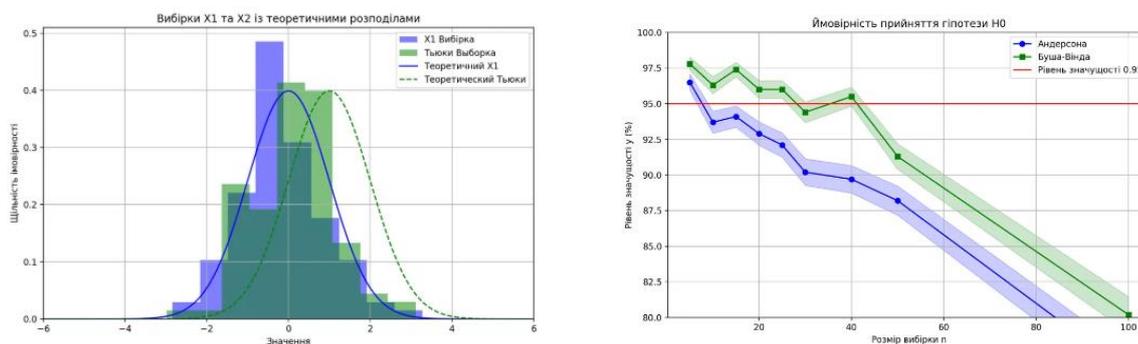


Рисунок 4 - Гістограма та ймовірність прийняття рішення щодо нульової гіпотези з внесенням забруднення у другу вибірку ( забруднення – 20%)

Проведені дослідження показали, що кожен з критеріїв має свої переваги та обмеження залежно від специфіки вибірок та їх статистичних параметрів. Критерій Андерсона демонструє високу точність при роботі з великими вибірками з нормальним та рівномірним розподілом ймовірності. Критерій Буша-Вінда дозволяє проводити аналіз вибірки з різними характеристиками розподілу ймовірності, але за результатами дослідження визначено, що може бути прийняття помилкового рішення, щодо нульової гіпотези, навіть за умов дослідження коротких вибірок. В такому випадку рекомендується використовувати додаткові методи для оцінки однорідності.

**Висновки.** У статті проведено дослідження двох критеріїв: двох вибіркового критерію Андерсона та комбінованого критерію Буша-Вінда для визначення однорідності псевдовипадкових вибірок. Псевдовипадкові вибірки формувалися з урахуванням статистичних параметрів розподілу ймовірності (нормальний розподіл ймовірності та забруднені вибірки Тьюкі з різним ступенем забруднення). За результатами проведеного дослідження можна стверджувати, що чим більше вноситься відсоток забруднення (шум) у одну з вибірок, що порівнюються за критеріями Андерсона та Буша-Вінда, тим більше приймається рішення щодо альтернативної гіпотези –  $H_1$ . Тобто критерії Андерсона та Буша-Вінда дійсно здатні виявити відмінність, яке викликане забрудненням і особливо це можемо бачити на вибірках  $n \leq 40$ . Для перевірки вибірок з невідомими статистичними параметрами найкраще підходить двох вибіркового критерій Андерсона.

Слід зазначити, що зі збільшенням відсотка забруднення ймовірність прийняття  $H_0$  знижується для обох критеріїв, що свідчить про зростання ймовірності помилкового відхилення  $H_0$ . Однак критерій Андерсона демонструє вищу стійкість до аномалій, особливо при малих вибірках ( $n=20\div 40$ ), де розкид його результатів менший, порівняно з критерієм Буша-Вінда. Для великих вибірок ( $n\geq 60$ ) вплив забруднення на обидва критерії зменшується, що узгоджується із законом великих чисел. Якщо вибірки у дослідженні  $n\leq 100$ , то критерій Андерсона є більш надійним для аналізу даних із невідомими статистичними параметрами. Для підвищення надійності результатів дослідження, в умовах, коли вибірки з невідомими статистичними параметрами – доцільно комбінувати статистичні критерії з методами очищення даних або використовувати робастні аналоги. Отримані результати можуть бути корисними для проведення статистичного аналізу у різних наукових і прикладних дослідженнях, включаючи контроль якості продукції, оцінку надійності вимірювальних приладів, аналіз економічних даних та інші сфери, де необхідно визначати статистичну однорідність вибірок. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення спектра критеріїв, що застосовуються, та розробку нових підходів до оцінки статистичної однорідності вибірок з урахуванням складніших математичних моделей і методів машинного навчання.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Malaichuk, V., Klymenko, S., & Astakhov, D. (2023). Computer Processing of Measurements in Problems of Observation of the Condition of Technical Objects. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 99-106. <https://doi.org/10.15421/452213>
2. Kobzar, A. I. (2006). *Applied Mathematical Statistics: For Engineers and Researchers*. М.: Fizmatlit.– P. 816
3. GailF. FahoomeTwenty Nonparametric Statistics And Their Large Sample Approximations / *Journal of Modern Applied Statistical Methods*. No2, Wayne State University, 2002. p.248–268.
4. Hajek J. *Nonparametric Statistics*. Holden-Day, San Francisco, 1969. – P. 346.
5. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології. / уклад. М. М. Горонескуль. Харків: УЦЗУ, 2009. 90с.
6. Турчин В.М. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. пос. Дніпропетровськ: ІМА, 2014. 556 с.
7. Рогач І.М., Керецман А.О., Сіткар А.Д. Правильно вибраний метод статистичного аналізу – шлях до якісної інтерпритації даних медичних досліджень. Науковий вісник Ужгородського університету, серія «Медицина», випуск 2 (56), 2017 р. Режим доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/31008/1/25>.

#### REFERENCES

1. Malaichuk, V., Klymenko, S., & Astakhov, D. (2023). Computer Processing of Measurements in Problems of Observation of the Condition of Technical Objects. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 99-106. <https://doi.org/10.15421/452213>
2. Kobzar, A. I. (2006). *Applied Mathematical Statistics: For Engineers and Researchers*. М.: Fizmatlit.– R. 816

3. GailF. FahoomeTwenty Nonparametric Statistics And Their Large Sample Approximations / Journal of Modern Applied Statistical Methods. No2, Wayne State University, 2002. p.248–268.
4. Hajek J. Nonparametric Statistics. Holden-Day, San Francisco, 1969. – R. 346.
5. Tablytsi funktsii ta krytychnykh tochok rozpodiliv. Rozdily: Teoriia ymovirnostei. Matematychna statystyka. Matematychni metody v psykhologii. / uklad. M. M. Horoneskul. Kharkiv: UTsZU,2009. 90s.
6. Turchyn V.M. Teoriia ymovirnostei i matematychna statystyka: navch. pos. Dnipropetrovsk: IMA, 2014. 556 s.
7. Rohach I.M., Keretsman A.O., Sitkar A.D. Pravylny vybranyi metod statystychnoho analizu – shliakh do yakisnoi interpretatsii danykh medychnykh doslidzhen. Naukovi visnyk Uzhhorodskoho universytetu, seriia «Medytsyna», vypusk 2 (56), 2017 r. Rezhym dostupu: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/31008/1/25>.

Received 14.05.2025.  
Accepted 19.05.2025.

### ***Testing the homogeneity of pseudorandom sample by the anderson and Bush-Wind criteria***

*The study of statistical homogeneity of samples is an important task in mathematical statistics, since it allows us to assess the reliability of experimental measurements and determine whether they belong to the same general population. This article considers two approaches to checking statistical homogeneity of samples: the two-sample Anderson criterion and the combined Bush-Wind criterion. Each of these criteria has its own characteristics, scope and effectiveness depending on the sample size and probability distribution being analyzed. The purpose of the study: to assess the effectiveness of two approaches to checking statistical homogeneity of samples: the two-sample Anderson criterion and the combined Bush-Wind criterion, as well as to determine the influence of sample size and statistical parameters of pseudo-random variables, and to identify the disadvantages and advantages of using these criteria. Research methods: the study considers the criteria for checking the homogeneity of pseudorandom variables: the two-sample Anderson criterion and the combined Bush-Wind criterion, which are used to determine the homogeneity of pseudorandom samples under conditions of unknown statistical parameters (probability distribution, mathematical expectation, variance. Scientific novelty of the study: it was determined that, if the samples under study are  $n \leq 100$ , then the Anderson criterion is more reliable for the analysis of pseudorandom variables with unknown statistical parameters, since it demonstrates higher resistance to anomalies, compared to the combined Bush-Wind criterion. It was determined that when studying small samples ( $n=20 \div 40$ ) both criteria show a high probability of making the correct decision when analyzing pseudorandom variables for homogeneity with different statistical parameters. Practical novelty of the study: for the analysis of random variables with unknown statistical parameters for short samples, it is proposed to use the two-sample Anderson criterion and the combined criterion Bush-Wind, but to increase the reliability of the results in the study, in conditions of contamination, it is advisable to combine statistical criteria with data cleaning methods or use robust analogues. Areas of application: the study can be used in ar-*

*cases where it is necessary to assess the statistical homogeneity of samples, in experimental sciences, sociology, medicine and engineering, to assess the quality of measurements and identify possible deviations in the data.*

*Keywords: mathematical statistics, method, sample, probability distribution, Anderson criterion, Bush-Wind criterion.*

**Клименко Олексій Денисович** - аспірант кафедри кібербезпеки і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

**Klymenko Oleksii** - postgraduate student of the Department of Cybersecurity and Computer-Integrated Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

Oleksandr Movchan

**ADVANCED DAMAGE - PLASTICITY MODELLING AND CALIBRATION  
STRATEGIES FOR ACCURATE FINITE - ELEMENT ANALYSIS OF  
UNREINFORCED CONCRETE IN THIN - WALLED STRUCTURES**

*Anotation. Accurate prediction of unconventional, unreinforced concretes in three-dimensional finite-element analysis demands a synthesis of advanced constitutive theory, rigorous experimental calibration, and careful numerical implementation. This study consolidates recent progress and remaining challenges in modeling slag-blended, recycled-aggregate, fiber-reinforced, and ultra-thin formwork concretes within the ANSYS environment. A literature survey identifies three dominant strategies for plain concrete: the legacy smeared-crack SOLID65 element, generalized Drucker–Prager plasticity with user-defined damage, and detailed mesoscale representations that resolve aggregates, mortar, and interfaces. Comparative findings show that damage-plasticity formulations, exemplified by the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model, reproduce load–deflection responses and crack patterns within fifteen percent of experimental results when parameters are calibrated against comprehensive test sets that include compression, tension, fracture, and time-dependent data. Calibration protocols remain inconsistent across studies, hindering reproducibility and cross-comparison. The absence of an open benchmark database for non-standard concretes is highlighted as a key barrier to consensus on default parameters. Thin-walled elements expose additional difficulties: geometric nonlinearity couples with progressive stiffness degradation, causing mesh-dependent fracture energy dissipation and solver convergence issues. Remedies include refined through-thickness meshes, nonlocal regularization, and robust arc-length solution controls. Explicit crack-tracking techniques such as phase-field fracture and cohesive segments offer improved fidelity, especially for fiber-rich mixes where residual tensile capacity governs serviceability, yet systematic validation of these methods remains sparse. Long-term phenomena such as creep, shrinkage, and durability, along with high-rate behaviors under impact and seismic loading, are underrepresented in current model verification, particularly for slag-rich and recycled-aggregate mixes. A practical roadmap is proposed that integrates five core actions: creation of a public benchmark database with fully documented laboratory tests; development of unified modeling protocols that specify calibration sequences, error metrics, and reporting formats; targeted investment in explicit fracture models for thin and fiber-reinforced members; expansion of long-term and dynamic experimental programs; and adoption of machine-learning tools to automate parameter identification and flag anomalous model behavior. Complementary software advances, including plug-and-play material subroutines and graphical calibration wizards, are recommended to lower the exper-*

*tise threshold for practicing engineers. Collectively, these measures chart a pathway from current academic advances toward robust, industry-ready simulations capable of guiding the design of sustainable, reinforcement-free concrete structures.*

*Key words: finite-element analysis, damage-plasticity modeling, fiber-reinforced concrete, recycled-aggregate concrete, thin-walled formwork, model calibration*

**Statement of the problem.** Concrete exhibits pronounced heterogeneity, strain-rate sensitivity, and quasi-brittle fracture, all of which complicate its representation in three-dimensional finite-element analysis (FEA). The challenge intensifies for unconventional, unreinforced mixes: slag-blended, recycled-aggregate, fiber-reinforced, and ultra-thin concretes employed as permanent formwork because their mesoscale composition departs markedly from that of conventional Portland cement concrete. Reliable prediction of cracking, crushing, and post-peak softening therefore demands material models that go beyond the legacy smeared-crack or linear elastic-perfectly plastic formulations still common in industrial workflows.

Current research converges on three methodological pillars. First, sophisticated constitutive laws – most prominently Concrete Damage Plasticity (CDP), Drucker-Prager, and related damage-plasticity hybrids are adopted to capture stiffness degradation, tension-compression asymmetry, and irreversible volumetric dilation. Second, model parameters are calibrated against targeted laboratory data, including not only uniaxial tension and compression tests but also fracture-energy, size-effect, and cyclic-loading protocols that reveal rate-dependent and path-dependent behavior. Third, numerical tactics such as adaptive meshing, non-local regularization, and staged loading are introduced to maintain solution objectivity once strain localization initiates.

This article reviews state-of-the-art ANSYS implementations for unreinforced concretes, with special attention to thin-walled elements where through-thickness cracking, hydrostatic casting pressure, and local buckling pose additional difficulties. Experimental campaigns that underpin parameter identification are synthesized, and modelling workflows are distilled into reproducible steps. Representative case studies drawn from literature illustrate the best practice, while contrasting influential investigations by geometry, constitutive framework, calibration strategy, and achieved predictive accuracy. The discussion culminates in recommendations for practitioners and highlights emerging trends, such as machine-learning-assisted parameter inversion and phase-field fracture formulations that are poised to advance concrete simulation in commercial FEA environments.

**Analysis of the latest research and publications.** Three principal modeling routes dominate current ANSYS practice for unreinforced concrete. The legacy option employs the SOLID65 element, which embeds a smeared-crack formulation coupled to the Willam-Warnke failure surface [1]. By reducing elastic moduli at integration points once tensile cracking or compressive crushing initiates, SOLID65 can replicate stiffness degradation; however, abrupt modulus drops often trigger convergence difficulties. Researchers have mitigated this weakness by tuning the crushing-stiffness factor (CSTIF), thereby stabilizing cyclic analyses of concrete-filled tubes and aligning numerical responses with experiments.

A second route relies on general nonlinear elements such as SOLID185 or SOLID186, assigned an elastic-plastic law with a Drucker-Prager yield criterion and optional damage regularization [2]. Crack propagation is approximated through element birth-death procedures or strain-based failure rules. Although less concrete-specific, this framework gains versatility through USERMAT subroutines, which allow implementation of damage-plasticity laws comparable to the Concrete Damaged Plasticity model available in other FEA platforms.

The third, research-oriented route constructs mesoscale representations that discretely model aggregates, mortar, and interfacial transition zones [3]. Random placement of coarse particles or short fibers, scripted in APDL, captures initiation and coalescence of microcracks more realistically than homogeneous continua, albeit at substantial computational cost. Selecting among these approaches therefore entails a trade-off between numerical efficiency and the fidelity required to reproduce mixed specified fracture phenomena.

Robust finite-element prediction of unconventional, unreinforced concretes hinges on constitutive laws that reconcile compression hardening with tension-softening fracture. The literature converges on damage-plasticity frameworks, spearheaded by the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model [4]. CDP couples a multisurface yield function with scalar damage variables  $d_t$  and  $d_c$  that degrade the elastic modulus during cracking or crushing, thereby reproducing unloading stiffness loss and cyclic degradation. Key parameters – dilation angle, eccentricity, shape factor  $K_c$ , and the biaxial-to-uniaxial strength ratio are routinely back-calibrated to uniaxial, biaxial, and fracture-energy tests; once tuned, CDP has reproduced load-deflection responses of fibered and recycled-aggregate beams within ten to fifteen percent of experiment. In commercial ANSYS, comparable behavior is achieved through USERMAT subroutines or by invoking concrete formulations in LS-DYNA and Autodyn, confirming that algorithmic availability rather than theoretical limitation governs platform choice.

Plasticity-only options remain widespread when computational economy is paramount. The Drucker-Prager surface, implemented in standard SOLID185/186 elements, captures pressure-dependent yield and confinement effects, but requires auxiliary tension cutoffs or element deletion to mimic cracking, a simplification that restricts accuracy in post-peak regimes. Enhanced yield criteria such as Menétrey-Willam extend Drucker-Prager by differentiating tensile and compressive meridians and underpin the cracking logic of legacy SOLID65 elements [5]. At the research frontier, microplane models and mesoscale formulations deliver fidelity across loading paths, albeit at the cost of parameter sets and run time [6]. Specialized high-rate models RHT and HJC enrich the toolbox for impact and blast scenarios [7]. Experimental calibration and, where necessary, regularization remain decisive for stability and predictive reliability.

Calibration with experimental data also should be provided. Material parameters must be grounded in laboratory evidence before a concrete model can predict structural behavior with confidence. Fundamental calibration begins with stress-strain curves in compression and tension, which supply Young's modulus, peak strengths, and post-peak slopes. Fiber additions typically flatten the descending branch, while high slag replacement may lower both modulus

and strength; these trends should inform hardening or damage functions. Fracture energy, measured from notched-beam tests, governs the tension-softening curve [8]. Higher values observed in fiber-reinforced mixes translate to wider crack openings at residual strength, whereas recycled aggregates often reduce fracture energy and must be reflected by steeper softening.

Advanced yield surfaces such as Drucker-Prager or Menétrey-Willam require biaxial and triaxial data to fix friction and dilation angles. When full multiaxial tests are unavailable, published values or sensitivity studies can substitute, with parameters adjusted until finite-element load-deflection curves align with experiments. Iterative model updating, sometimes automated through optimization algorithms, further refining stiffness, peak load, and crack patterns. Finally, long-term phenomena like creep, shrinkage, or cyclic degradation are tuned to field or laboratory time-history data, completing a calibration workflow that converts generic constitutive laws into mix-specific predictive tools [9-10].

Thin concrete walls and permanent formwork panels pose coupled material-structural difficulties that differ markedly from those in massive members. Their high slenderness ratios amplify geometric nonlinearity; once tensile cracking degrades stiffness, out-of-plane instability can develop well below the elastic buckling load. Accurate prediction therefore demands large-deflection analysis combined with a fracture-capable constitutive law. Robust solution controls, such as arc-length or displacement-control algorithms, are often required to trace snap-through or snap-back paths without numerical divergence.

Mesh objectivity is a second concern. With only one or two solid elements through the thickness, the crack band width is fixed artificially, leading to mesh-dependent energy dissipation. Objective results call for either a refined through-thickness mesh or a nonlocal or regularized damage formulation that decouples fracture energy from element size. Element deletion strategies must also be applied cautiously; wholesale removal of coarse elements can produce unrealistically soft post-peak responses in thin panels.

Boundary conditions during casting introduce additional complexity. Hydrostatic pressure from fresh concrete can bow to a thin panel before the mix gains strength. Realistic staging therefore applies time-dependent lateral pressure while the panel itself undergoes strength development and possibly temperature or shrinkage strains. Omission of these effects can overpredict serviceability performance.

Material behavior further complicates matters. Ultra-high-performance concrete and glass-fiber-reinforced concrete exhibit strain hardening and residual tensile capacity that must be included through multilinear tension curves or damage models with residual stress plateaus [11]. Neglecting fiber bridging leads to unconservative crack-width predictions and underestimated flexural capacity.

Finally, dynamic phenomena may arise because thin elements possess low mass and stiffness. Sudden crack formation can trigger inertial oscillations that alter load-displacement histories. Incorporating a small viscosity parameter or performing explicit transient analysis can capture these rate effects.

Collectively, these challenges underscore the need for calibrated damage-plasticity models, fine or regularized meshes, staged loading, and validation against targeted experiments when simulating thin concrete formwork in ANSYS.

A review of the recent literature highlights several recurring findings that guide material selection and modeling strategy. First, partial replacement of cement with slag or fly ash alters early-age kinetics, often slowing strength development and modifying creep and shrinkage rates. Finite-element models should therefore reduce early compressive strength and, when early loading is critical, include maturity effects; at standard 28-day testing ages, moderate slag replacement can be modeled with compressive strength values like ordinary Portland cement concrete.

Second, recycled aggregate concrete introduces pre-existing flaws at the old mortar interface. Engineers have two practical options: reduce bulk properties such as Young's modulus, tensile strength, and fracture energy in a homogeneous model, or explicitly mesh aggregates and mortar in a two-phase mesoscale scheme. Laboratory data suggest that 30 percent aggregate replacement typically lowers modulus by about 10 percent and tensile strength by about 20 percent, values that provide a reliable starting point for homogeneous models.

Third, discrete fibers without steel rebar enhance ductility and fracture energy. Constitutive laws must raise the residual tensile stress in the post-crack regime, using residual-strength ratios available in codes or derived from beam tests. Omitting this adjustment markedly underestimates load capacity and overpredicts crack widths.

Fourth, thin-walled elements and permanent formwork demand accurate serviceability predictions. Nonlinear fracture models calibrated to crack-width data outperform purely elastic approaches for these applications.

Across all material variants, rigorous calibration and validation against laboratory results remain essential; default material parameters seldom achieve acceptable accuracy without targeted adjustment.

**Presentation of the main material of the research.** Despite steady progress in constitutive theory and numerical techniques, several critical research gaps continue to limit the predictive power and practical uptake of concrete simulation. Foremost is the absence of a standardized calibration protocol. Although nearly every study stresses the need to tune model parameters against laboratory evidence, the procedures adopted vary widely, ranging from manual curve fitting to ad hoc inverse analyses. The lack of a shared benchmark database for compressive, tensile, flexural, and fracture tests hampers cross-comparison and slows convergence toward reliable default values. Establishing universally accepted calibration guidelines, supported by open repositories of well-documented experimental data, would provide a common reference point and accelerate methodological consensus.

A second limitation concerns the representation of cracking. Mainstream frameworks such as Concrete Damaged Plasticity or Drucker-Prager typically employ smeared-damage formulations that diffuse fracture energy over the finite-element mesh. While computationally efficient, this approach struggles to reproduce localized crack paths and their interaction with geometric instability in thin-walled or fiber-reinforced members. Emerging techniques such as

phase-field fracture, discrete crack insertion, and cohesive interface elements offer the potential to track crack initiation and propagation explicitly, yet systematic studies that compare these methods and validate them against detailed imaging of crack evolution remain scarce.

Long-term and high-rate behaviors constitute a third underexplored domain. Most numerical investigations target short-term strength and initial cracking, paying less attention to creep, shrinkage, thermal cycling, or durability phenomena that govern service life, especially in slag-rich or recycled-aggregate concretes. Likewise, dynamic loading scenarios such as impact, blast, or seismic excitation are often addressed with empirical high-rate models whose parameters have not been verified for modern, unreinforced mixes or thin panels. Expanded programs of time-dependent and dynamic testing, coupled with model refinement and validation, are therefore imperative.

Finally, the practical deployment of advanced models is hindered by the dual challenges of mesoscale complexity and user accessibility. Interface behavior between aggregates, fibers, and mortar is known to control strength and fracture, yet mesoscale simulations remain computationally intensive and difficult to generalize. Parallel advances in machine-learning-assisted parameter identification and in intuitive software toolkits could lower the expertise barrier, enabling practicing engineers to exploit sophisticated damage-plasticity or microplane formulations without resorting to bespoke user subroutines. Closing these gaps will be essential for translating academic advances into robust, industry-ready design tools.

Advancing concrete simulation hinges on a coordinated strategy that blends shared data resources, methodological rigor, and modern digital tools. An open benchmark database containing meticulously documented tests: compression, tension, fracture, creep, shrinkage, and high-rate loading for both conventional and non-standard mixes would give researchers a common reference for calibration and validation, promoting objective cross-comparison. Building on that foundation, the community can draft unified modeling protocols that spell out recommended calibration sequences, target error metrics, mesh-objectivity checks, and reporting formats; a consensus document of this sort streamlines peer review and accelerates the flow of best practice into everyday engineering work.

With reliable data and clear procedures in place, attention can shift to improving crack-tracking fidelity. Explicit approaches such as phase-field fracture, cohesive segments, or discrete crack insertion deserve systematic evaluation against imaging-based observations, particularly for thin panels and fiber-reinforced concretes where smeared models lose accuracy. Long-term and dynamic behaviors must also be incorporated: experimental programs that pair creep and shrinkage measurements with environmental histories, along with impact and seismic tests on modern mixes, will supply the rate-dependent parameters that current formulations lack.

Machine learning provides a practical means of automating these workflows. Surrogate models trained on the benchmark database can expedite inverse analysis, suggest initial parameter values, and flag outlier responses, thereby reducing analyst effort and improving reproducibility. Complementing these advances, plug-and-play material subroutines, graphical calibration wizards, and detailed documentation will lower the expertise threshold, ensuring

that sophisticated constitutive laws migrate from academic studies into routine design practice.

**Conclusions.** Accurate finite-element analysis of unconventional, unreinforced concretes now follows a well-defined workflow that pairs advanced constitutive laws with systematic experimental calibration. Damage-plasticity models remain the most dependable option because they capture both compression hardening and tension softening, while simpler yield-surface approaches can perform acceptably when supplemented by explicit tensile failure rules and verified against a broad test set. The foundation of any reliable simulation is high-quality data: compressive, tensile, flexural, fracture, and time-dependent tests supply the parameters that let calibrated models reproduce load–deflection curves and crack patterns within about fifteen percent of laboratory observations.

Important gaps still limit predictive power and everyday use. A public benchmark database of validated tests would give analysts a common reference for parameter identification, encourage objective cross-comparison, and speed agreement on default values. Clear modeling protocols that spell out calibration sequences, error metrics, mesh-objectivity checks, and reporting formats would turn diverse research practices into industry-ready standards. Thin-walled and fiber-reinforced elements continue to expose weaknesses in smeared-damage formulations; focused studies that compare phase-field, cohesive, and discrete-crack methods against detailed imaging are needed to track localized fracture and its interaction with geometric instability. Long-term effects such as creep, shrinkage, and durability, along with dynamic loading scenarios like impact and seismic excitation, are still underrepresented in validation programs, especially for slag-rich and recycled-aggregate mixes.

Machine learning can bridge complexity and usability. Surrogate models trained on benchmark data can automate inverse analysis, suggest starting parameter sets, and flag outliers, reducing analyst effort and improving reproducibility. User-friendly software additions plug-and-play material subroutines, graphical calibration tools, and thorough documentation will further lower the expertise threshold. By combining these practical recommendations with proven damage-plasticity modeling and rigorous calibration, engineers can extend finite-element simulation confidently to the next generation of sustainable, reinforcement-free concrete structures.

## REFERENCES

1. Barghlame Hadi, CONVERGENCE PROBLEMS WITH ANSYS'S SOLID 65 FINITE ELEMENT IN CONCRETE-FILLED TUBULAR (CFT) COLUMNS AS A CASE STUDY, Archives for Technical Sciences 2023, 28(1), 29-38, <http://dx.doi.org/10.59456/afts.2023.1528.029B>
2. Bilal, K.A.; Mahamid, M.; Hariri-Ardebili, M.A.; Tort, C.; Ford, T. Parameter Selection for Concrete Constitutive Models in Finite Element Analysis of Composite Columns. Buildings 2023, 13, 1759. <https://doi.org/10.3390/buildings13071759>
3. Yong Yu, Yu Zheng, Yongchang Guo, Shouwang Hu, Kaihui Hua, Mesoscale finite element modeling of recycled aggregate concrete under axial tension, Construction and Building

Materials, Volume 266, Part A, 2021, 121002, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121002>.

4. Guan, Q.; Yang, M.; Shi, K.; Zhang, T. Experimental Study and Finite Element Analysis on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams. *Materials* 2022, 15, 8210. <https://doi.org/10.3390/ma15228210>
5. Pokorska I, Poński M, Kubissa W, Libura T, Brodecki A, Kowalewski Z. Computational Fracture Evolution Analysis of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Using Concrete Continuous Damage and Fiber Progressive Models. *Materials (Basel)*. 2023 Aug 15;16(16):5635. doi: 10.3390/ma16165635. PMID: 37629926; PMCID: PMC10456427.
6. Di Luzio, G., & Cusatis, G. Solidification–microprestress–microplane (SMM) theory for concrete at early age: Theory, validation and application. *International Journal of Solids and Structures*, 50(6), 957–975, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2012.11.022>
7. Li J, Liu Y, Li P, Wang H, Chen P. Study on the Suitability of Concrete Constitutive Models for Perforation Simulation. *Materials (Basel)*. 2024 Nov 14;17(22):5562. doi: 10.3390/ma17225562. PMID: 39597387; PMCID: PMC11595891.
8. Murthy, A.R., Prasanna, P.K., Nipun, G. et al. Analysing the influence of ground granulated blast furnace slag and steel fibre on RC beams flexural behaviour. *Sci Rep* 14, 4914 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51164-x>
9. Rongzong Wu, John Harvey, Jeremy Lea, Angel Mateos, Shuo Yang, and Noe Hernandez Updates to CalME and Calibration of Cracking Models, 2021
10. Wan-Wendner, Roman & Vorel, Jan & Smith, Jovanca & Hoover, Christian & Bazant, Zdenek & Cusatis, Gianluca. (2014). Characterization of concrete failure behavior: A comprehensive experimental database for the calibration and validation of concrete models. *Materials and Structures*. 48. 10.1617/s11527-014-0426-0.
11. Zhengwei Li, Meizhong Wu, Jiawei Wu, Yujun Cui, Xingwei Xue Steel Fibre Reinforced Concrete Meso-Scale Numerical Analysis, *Advances in civil engineering*, 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/2084646>

Received 14.05.2025.  
Accepted 19.05.2025.

**Удосконалені моделі пластичності з урахуванням руйнування  
та стратегії калібрування для точного скінченно-елементного аналізу  
бетону без армування у тонкостінних конструкціях**

*Точне прогнозування поведінки нетрадиційних, неармованих бетонів у тривимірному скінченно-елементному аналізі потребує синтезу розвинутої конститутивної теорії, ретельної експериментальної калібровки та уважної числової реалізації. У цій роботі узагальнено останні досягнення й окреслено актуальні виклики моделювання шлакопортландцементних, бетонів на переробленому заповнювачі, волокнистих та ультратонких опалубних бетонів у середовищі ANSYS. Огляд літератури виділяє три провідні підходи для звичайного бетону: класичний елемент SOLID65 із розмазано-тріщинною моделлю, узагальнена пластичність Друкера-Прагера з користувацьким пошкодженням і детальні мезомоделі, що розрізняють заповнювач, розчин і межові зони. Порівняльний аналіз показує, що пошкоджено-пластичні формулювання, зокрема модель Concrete Damaged Plasticity (CDP), відтворюють криві навантаження-прогину*

та картини тріциноутворення з точністю до 15 % за умови калібрування параметрів на повному наборі випробувань на стиск, розтяг, розкол і тривалу поведінку. Проте протоколи калібрування залишаються несистематизованими, що ускладнює відтворюваність і порівнянність результатів. Відсутність відкритої еталонної бази даних для нетрадиційних бетонів визнано ключовою перешкодою на шляху до узгоджених початкових параметрів. Тонкостінні елементи створюють додаткові труднощі: геометрична нелінійність поєднується з прогресуючим зниженням жорсткості, спричиняючи залежне від сітки розсіяння енергії руйнування та проблеми збіжності розв'язку. Як заходи пропонуються уточнене сіткування крізь товщину, нелокальна регуляризація та стійкі алгоритми дугової довжини. Явні методи відстеження тріщин, зокрема фазово-польове руйнування та когезійні сегменти, підвищують точність, особливо для сумішей із високим вмістом волокон, де залишкова несуча здатність у розтягу визначає експлуатаційну придатність, однак їх систематична верифікація поки що обмежена. Довготривалі явища, такі як повзучість, усадка, довговічність, а також високошвидкісні навантаження при ударах чи сейсмічних впливах недостатньо представлені у сучасних програмах перевірки моделей, особливо для бетонів зі шлаком і переробленим заповнювачем. Запропоновано практичну «дорожню карту», що об'єднує п'ять ключових дій: створення публічної еталонної бази випробувань; розроблення уніфікованих протоколів моделювання з чіткими метриками похибок; цільові інвестиції в явні моделі тріциноутворення для тонкостінних та волокнистих елементів; розширення довготривалих і динамічних експериментальних програм; упровадження машинного навчання для автоматизації підбору параметрів і виявлення аномальної поведінки моделей. Супутні програмні вдосконалення підключні підпрограми матеріалів «plug-and-play» та графічні майстри калібрування знижують поріг входу для практикуючих інженерів. Сукупно ці заходи прокладають шлях від академічних напрацювань до надійних, готових до промислового використання симуляцій, здатних підтримати проектування стійких бетонних конструкцій без арматури.

*Ключові слова:* Скінченно-елементний аналіз, пошкоджено-пластичне моделювання, волокнистий бетон, бетон на переробленому заповнювачі, тонкостінна опалубка, калібрування моделей.

**Мовчан Олександр Юрійович** – аспірант Українського Державного Університету Науки і Технологій, ННІ «Придніпровська Державна Академія Будівництва та Архітектури», кафедра Технології Будівельного виробництва.

**Movchan Oleksandr** – postgraduate student at Ukrainian State University of Technologies and Science, ESI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”.

## DETECTING FLAT ROOF DEFECTS WITH MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING TECHNIQUES

*Anotation. Deep learning has emerged as a transformative approach for detecting structural damage and deformations, particularly for flat roofs and large-scale infrastructure. This article synthesizes recent progress in applying convolutional neural networks (CNNs), segmentation models, object detectors (YOLO, Faster R-CNN), and autoencoders for unsupervised anomaly detection. Drones (UAVs), thermal imaging, and vibration sensing all contribute critical data. By training on images or signals indicative of healthy vs. damaged conditions, deep models can locate cracks, spalling, missing fasteners, or stiffness loss at high speed and with impressive accuracy - often above 85%. A review of more than 300 publications indicates that remote inspection with AI can drastically reduce manual labor and improve the consistency of damage identification, even in hazardous or inaccessible areas. A summary table compares deep learning effectiveness across beams, walls, decks, roofs, and other structural components. Real-world deployments on bridges, high-rise facades, and post-disaster zones confirm that deep learning, coupled with UAV-based inspections, can accelerate maintenance workflows, detect subtle defects, and reduce safety risks. Ongoing challenges include data scarcity for rare failure modes, generalizing models to new environments, and the integration of physics-based reasoning. Recommendations for future research involve fusing multispectral data, automating calibration of deep models, and embedding AI in digital twins for continuous structural health monitoring.*

*Key words: deep learning, machine learning, flat roof defects, structural damage, UAV, computer vision, CNN, semantic segmentation, object detection, autoencoders*

**Statement of the problem.** Structural integrity is vital for safety and longevity. Flat roofs, in particular, are vulnerable to cracks, water infiltration, and other failures that may remain unnoticed in manual inspections. Conventional inspection methods can be cumbersome, time-consuming, and risky for inspectors. This creates a pressing need for automated, intelligent damage detection solutions. Recent technological progress especially in UAVs, camera hardware, and AI - has enabled large volumes of image or sensor data to be gathered rapidly. Yet this deluge of data poses its own challenge: manual review is impractical. Deep learning provides a way to handle these large datasets by learning patterns of healthy vs. damaged states, thus flagging potential defects with high accuracy.

**Analysis of the latest research and publications.** *Deep Learning Domination.* An extensive body of work shows that CNNs are the most widely adopted approach for structural

defect detection [1]–[3]. They excel at identifying cracks, surface spalling, and other damage forms from images. Researchers worldwide including teams in the USA, Europe, Ukraine, and China have refined CNN-based models (e.g., ResNet, VGG) or segmentation architectures (U-Net, Mask R-CNN, YOLO) to accurately pinpoint cracks in concrete, masonry, or asphalt [4], [5]. A 2023 review [1] covering 337 papers found that 60% rely on CNN-based image analysis, with *crack detection* the most common application (30% of studies).

*Extended Architectures and Unsupervised Methods.* To capture more complex phenomena, newer models integrate transformers into U-Net, achieving 4–6% gains in segmentation metrics [6]. Some authors employ unsupervised autoencoders that learn a “healthy” baseline of vibrations or thermal images, then flag anomalies if reconstruction error spikes [7]. These methods reduce dependency on labeled damage data and can detect unseen defect types.

*Role of Multimodal Sensing.* Studies increasingly incorporate thermal infrared (IR) imaging to uncover hidden defects such as water intrusion or subsurface delamination in flat roofs. UAV-based IR surveys can detect temperature irregularities that correspond to moisture pockets [8]. Laser scanning or 3D LiDAR further aids in capturing geometric deformations. Multimodal fusion—combining RGB, IR, vibration data improves detection accuracy and can differentiate superficial discoloration from genuine cracks or moisture infiltration [9].

*Real-World Applications.* Pilot projects confirm that deep learning can reduce labor and cost. Case studies from the USA indicate an AI-assisted inspection can be 50–70% cheaper than rope-access methods for tall facades or rooftops [10]. Europe and East Asia have also tested UAV-based deep learning to identify post-disaster building damage, which is critical for emergency response [3]. In Ukraine, deep models trained on pre- vs. post-conflict imagery facilitate rapid mapping of war damage [11]. These validations highlight the global acceptance of AI-driven inspection, excluding few regions that lack open publication or data-sharing.

**Research Objective.** This article aims to *systematically review* how deep learning can detect flat roof defects alongside general structural damage using modern sensing platforms. We target five goals:

- Survey CNN-based classification, segmentation networks (U-Net, Mask R-CNN), object detectors (YOLO, Faster R-CNN), and autoencoders.
- Highlight data sources (drone imagery, IR, vibration) and preprocessing steps to prepare them for deep learning.
- Present a comparison table that synthesizes detection accuracy across structural elements, including flat roofs.
- Describe practical case studies showing how UAV-based AI solutions drastically shorten inspection times and reduce costs.
- Discuss future trends: physics-based digital twins, hybrid AI, and regulatory frameworks to ensure reliability.

**Presentation of the Main Research Material. *Deep Learning Methods for Damage Detection. Convolutional Neural Networks (CNNs).*** CNNs have proven extremely effective at discerning cracks or corrosion directly from raw images. Classic approaches use patch-level classification (crack vs. no crack), while modern methods provide heatmaps or bounding boxes around damage. A ResNet-18 architecture, for example, might scan overhead photos of a roof, highlighting areas with potential membrane perforation. CNN performance depends heavily on image resolution and training data quality; small cracks (<0.3 mm) may go undetected if the camera or vantage point is insufficient.

*Semantic Segmentation: U-Net Variants.* Pixel-level damage identification is especially relevant for roofing systems, where water intrusion often occurs at small cracks or seam failures. Segmentation networks like U-Net and DeepLab can outline precise crack boundaries. Researchers incorporate improved skip connections or multi-scale context (e.g., U-Net++ or TransUNet) [6] Figure 1.

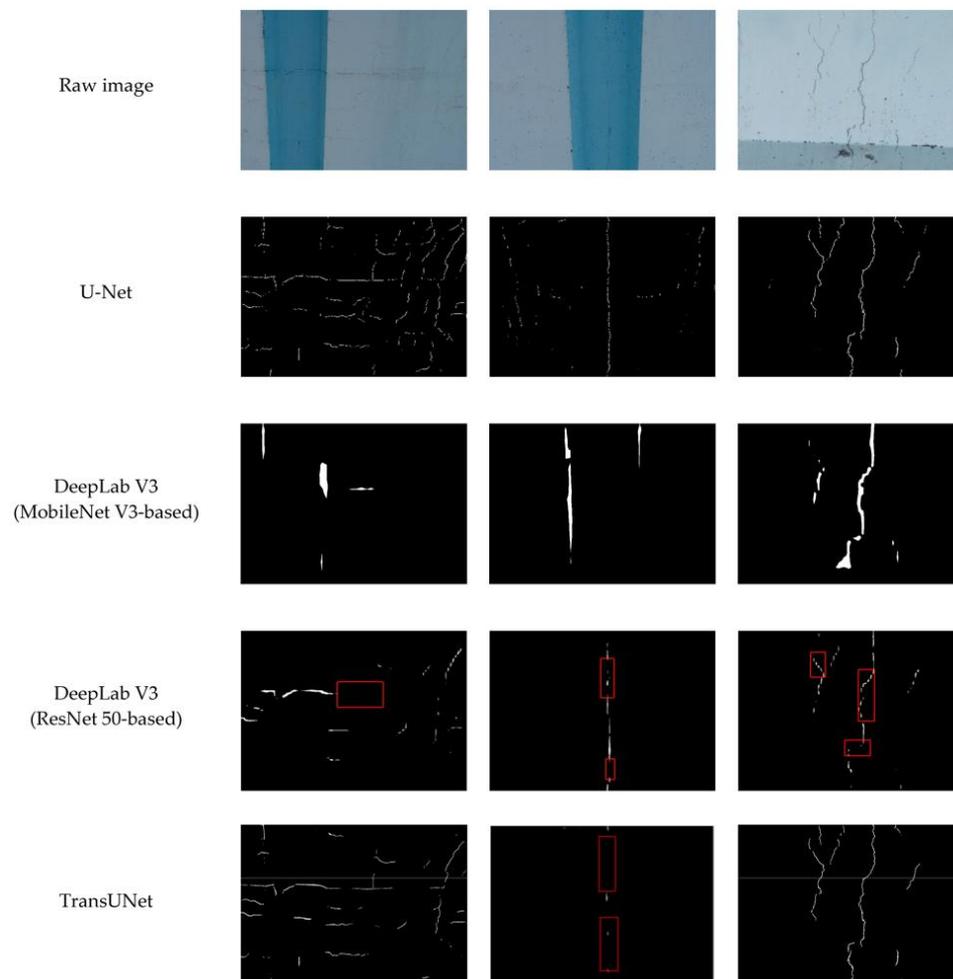


Figure 1 – Example comparison of crack segmentation outputs from different deep learning models on a concrete surface: a – raw UAV images of a bridge column with cracks; b – predicted crack masks using the U-Net model; c – predicted crack masks using the DeepLab V3 (MobileNet V3) model; d – predicted crack masks using the DeepLab V3 (ResNet 50) model; e – predicted crack masks using the TransUNet model. Red boxes indicate areas where some models missed or erroneously detected cracks

**Object Detection: YOLO and Faster R-CNN.** Large-scale defects such as spalled areas or missing roof shingles can be detected as “objects.” YOLO excels in real-time performance, allowing drones to stream video that is analyzed on-the-fly [4]. Two-stage detectors (Faster R-CNN) often yield slightly higher accuracy but are slower. For high-stakes tasks—e.g., final verification of severe roof damage—engineers might accept the computational cost for an extra margin of accuracy.

**Autoencoders for Anomaly Detection.** Autoencoders learn normal patterns from unlabeled data; deviations in reconstruction error can signal hidden damage, e.g., moisture infiltration beneath membranes or rebar corrosion in the roof slab. This approach helps when labeled “defect” data is scarce [7]. For instance, if a structural deck’s vibration signature shifts due to partial delamination, the autoencoder flags a higher anomaly score—even if the surface looks intact.

**Data Sources and Inspection Tools.** Drones (UAVs) are pivotal for surveying large flat roofs without requiring scaffolding or harnesses. Equipping drones with RGB and IR cameras enables the capture of complementary data: visible cracks vs. hidden moisture indicated by temperature variance [8]. Meanwhile, vibration sensors placed at roof supports or beams can detect changes in stiffness if a support girder is compromised. Preprocessing steps (stitching overlapping UAV photos into an orthomosaic) are crucial for large roofs. IR images must be calibrated to account for emissivity differences. Tools such as semi-automatic annotation can speed up dataset creation by suggesting crack outlines, which inspectors confirm.

**Real-World Applications and Case Studies. Roof Inspections.** Frequent roof inspections catch issues like ponding water, membrane punctures, or seam failures early. A UAV-based system in California used a YOLOv5 model on both visual and thermal images, achieving ~90% accuracy in identifying heat anomalies correlating with water infiltration [8]. Another pilot in Denmark used a tethered drone to scan entire industrial rooftops, detecting cracks and energy losses in near real-time. **Bridges, Facades, and Post-Disaster Surveys.** Although the focus is flat roofs, similar techniques apply to other structures. Bridges incorporate IR and optical cameras to find deck delamination or rebar exposure. Facade inspections in dense urban areas rely on UAVs or robotic systems to detect cracks in vertical surfaces. Post-disaster efforts (earthquakes, conflicts) use satellite or aerial images with deep learning to classify building damage severity across entire city blocks [3], [11].

**Summary Table of Model Performance.** Below is a condensed table highlighting results from various studies on different structural components, including roofs table 1. Accuracy ranges typically span 80–95%, with the highest results in well-controlled conditions. In practice, performance depends on lighting, image resolution, and training dataset diversity. Specialized tasks (cracks on rooftop membranes) may see slightly lower recall, demanding more advanced or higher-resolution imaging solutions.

Deep Learning Effectiveness Across Structural Components

Structural Component	Common Damage	Example DL Approach	Reported Performance
Roofs (flat or pitched)	Leaks, missing shingles, or cracks	YOLO for missing shingles, IR-based crack detection	~85–90% accuracy in real UAV tests [8]
Beams & Girders	Cracks, deflection	U-Net for cracks, autoencoder for anomaly detection	~95% precision on visible cracks [1]
Walls/Facades	Cracks, spalling	Mask R-CNN, YOLO, TransUNet for segmentation	90–96% accuracy in multiple studies [6]
Foundations	Settlement, moisture	Thermal imaging, GPR, LSTM on tilt sensors	80% detection of subsurface voids
Bridge Decks	Delamination, potholes	IR-based CNN, YOLO for real-time detection	~90–95% for cracks or delams [2], [4]

**Workflow Integration.** Workflow involves:

1. Data Collection: UAV captures overhead shots of the roof, possibly with IR.
2. Preprocessing: Stitch images into an orthomosaic, correct lens distortions, label any known defects.
3. Deep Learning Inference: Run object detectors or segmentation to highlight possible damage.
4. Post-Processing: Merge overlapping detections, measure crack length or area, and create a user-friendly map.
5. Verification: Inspectors confirm or dismiss AI findings, refining future model performance.

**Challenges and Future Directions.** *Data Scarcity:* Some critical roof failure modes (e.g., severe structural collapse) are thankfully rare, meaning few labeled examples. Generative Adversarial Networks (GANs) or synthetic data can help. *Generalization:* A model trained on typical commercial roofs might fail on older, historically significant structures with different materials. Transfer learning and domain adaptation remain vital. *Integration with Physics:* Combining AI with structural models (digital twins) can differentiate real damage from benign anomalies caused by thermal expansion or occupant load changes. *Regulatory Acceptance:* Standards for AI-based inspection remain in flux. Liability issues and guidelines for verifying algorithmic results need further clarification.

**Conclusions.** Deep learning is revolutionizing the detection of flat roof defects and broader structural damage, enabling cost-effective, frequent, and safer inspections. Across the literature, CNNs dominate for image-based analysis, while segmentation networks excel at

mapping cracks or spalls. Object detectors (YOLO) provide fast bounding-box detection of missing shingles or open seams, and autoencoders enable anomaly detection without large-labeled datasets. Real-world pilots consistently show 80–95% detection accuracy, with some controlled-lab experiments exceeding 95%. The rise of drones and multimodal sensing has amplified AI's impact. Thermal imaging reveals hidden moisture infiltration, vibration sensors detect stiffness changes, and LiDAR captures geometric deformation. Fusing these data streams can mitigate false positives. Meanwhile, the cost benefits—reducing manual labor—drive commercial adoption, from rooftop insurance surveys to post-disaster damage mapping. Challenges persist around model generalization, limited training data for rare failures, and robust interpretability to ensure safety-critical decisions. Nonetheless, the overarching trend is clear: advanced AI frameworks will continue to integrate into structural health monitoring, bridging data collection and engineering analysis to keep buildings, bridges, and roofs safer, longer. Future progress will likely focus on digital twin integration, improved domain adaptation techniques, and standardized guidelines for AI-based inspections.

#### REFERENCES

1. Jia, J., & Li, Y. (2023). Deep Learning for Structural Health Monitoring: Data, Algorithms, Applications, Challenges, and Trends. *Sensors*, 23(21), 8824.
2. Bai, Y., Sezen, H., & Yilmaz, A. (2021). Detecting Cracks and Spalling Automatically ... *ISPRS Annals*, V-2-2021, 161–168.
3. Montoya, G. A., et al. (2023). Toward Reliable Post-Disaster Assessment ... *Mathematics*, 13(7), 1041.
4. Theos AI (2022). *How to Train YOLOv7 on a Custom Dataset for Structural Damage Detection*. [Online: [blog.theos.ai](http://blog.theos.ai)]
5. Jin, T., et al. (2023). Deep-Learning- and UAV-Based Structural Crack Detection ... *Buildings*, 13(12), 3114.
6. Wu, Z., et al. (2025). VM-UNet++ Research on Crack Image Segmentation ... *Scientific Reports*, 15, 8938.
7. Neto, M. S., et al. (2024). Structural Damage Identification Using Autoencoders ... *Buildings*, 14(7), 2014.
8. Kulhandjian, H., et al. (2022). AI-Based Bridge and Road Inspection Framework Using Drones. Mineta Transportation Institute Report 22-26.
9. Huang, Y., et al. (2023). Crack Detection of Masonry Structure Based on Thermal ... *Automation in Construction*, 145, 104637.
10. Yeum, C.M., & Dyke, S.J. (2019). Vision-Based Automated Crack Detection ... *Comp.-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 34(7), 619-634.
11. Dietrich, O., et al. (2025). Open-Source Tool for Mapping War Destruction ... *Comm. Earth & Env.*, 6, 215.

Received 15.05.2025.  
Accepted 21.05.2025.

**Виявлення дефектів плоских покрівель за допомогою методів машинного навчання та глибокого навчання**

Глибоке навчання стало проривним підходом до виявлення конструктивних пошкоджень і деформацій, зокрема для плоских покрівель та великомасштабної інфраструктури. У цій статті узагальнено останні досягнення в застосуванні згорткових нейронних мереж (CNN), моделей сегментації, детекторів об'єктів (YOLO, Faster R-CNN) та автокодерів для безнаглядного виявлення аномалій. Дрони (БПЛА), тепловізійна зйомка та вібраційне зондування забезпечують критично важливі дані. Завдяки навчанню на зображеннях або сигналах, які відображають нормальний або пошкоджений стан, моделі глибокого навчання можуть швидко й точно виявляти тріщини, відшарування бетону, відсутні кріплення або втрату жорсткості — часто з точністю понад 85 %. Огляд понад 300 наукових публікацій свідчить, що дистанційна інспекція за допомогою ШІ може суттєво зменшити обсяг ручної праці та покращити стабільність ідентифікації ушкоджень навіть у небезпечних або важкодоступних зонах. Підсумкова таблиця порівнює ефективність глибокого навчання для балок, стін, перекриттів, покрівель та інших конструктивних елементів. Реальні приклади впровадження на мостах, фасадах висотних будівель і у зонах після стихійних лих підтверджують, що глибоке навчання у поєднанні з інспекцією БПЛА здатне прискорити обслуговування, виявити приховані дефекти та зменшити ризики для безпеки. Серед актуальних викликів — нестача даних для рідкісних типів пошкоджень, складність узагальнення моделей на нові умови та потреба у поєднанні з фізичними моделями. Серед рекомендацій для подальших досліджень — об'єднання мультиспектральних даних, автоматизація калібрування моделей та інтеграція ШІ в цифрові двійники для постійного моніторингу стану конструкцій.

*Ключові слова:* глибоке навчання, машинне навчання, дефекти плоских покрівель, пошкодження конструкцій, БПЛА, комп'ютерний зір, CNN, семантична сегментація, виявлення об'єктів, автокодери.

**Григорович Микита Сергійович** – здобувач Українського Державного Університету Науки і Технологій, ННІ «Придніпровська Державна Академія Будівництва та Архітектури», кафедра Технології Будівельного виробництва.

**Hryhorovych Mykyta** – applicant of Ukrainian State University of Technologies and Science, ESI “Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture”, ORCID ID: 0000-0002-5539-7493.

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПОШУКУ ТА ПОПЕРЕДНЬОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ У ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ОСВІТНІХ СИСТЕМ

*Анотація.* У статті окреслено проблеми застосування популярних інструментів штучного інтелекту GROK 3 та ChatCPT 4 для збирання наявних в інтернет даних про освітні системи, їх попередньої обробки й аналізу. Показано, що обидва інструменти дають змогу істотно прискорити і спростити виконання рутинних етапів досліджень, але GROK 3 дає змогу отримати більш повні, надійні і якісні дані, що може бути пов'язано як з можливістю доступу до актуальних даних мережі Інтернет, так і з відмінностями алгоритмів.

*Ключові слова:* штучний інтелект, система освіти, мережа закладів, фінансування, показники охоплення, збирання даних, описова статистика, надійність, релевантність, достовірність

**Вступ. Постановка проблеми.** Розроблення та застосування штучного інтелекту є одним з найбільш актуальних напрямів досліджень та розробок у сфері інформаційних технологій. Існує як багато ентузіазму, так і багато застережень стосовно застосування інструментів штучного інтелекту у дослідженнях та освітньому процесі. З одного боку, поширеною є думка, що штучний інтелект здатний самостійно розв'язувати будь-які прикладні, а можливо і наукові проблеми. З іншого боку, не менш поширеним є заперечення будь-яких спроб застосування інструментів штучного інтелекту не лише у науці, але і в освіті. Разом з тим, все більше фахівців схиляються до більш зваженого ставлення до штучного інтелекту і зосереджуються на вдосконаленні моделей та засобів штучного інтелекту, а також пошуку відповідей на питання: для яких задач, як саме і які саме засоби штучного інтелекту доцільно використовувати, якими є обмеження та можливі помилки при використанні конкретних інструментів для розв'язування конкретних типів задач, які проблеми забезпечення академічної доброчесності виникають при застосуванні штучного інтелекту тощо. Існує два основні напрями досліджень у сфері застосування методів штучного інтелекту у збиранні та аналізі даних про складні системи. Перший – це розроблення і вдосконалення моделей, алгоритмів, методів та інструментів для розв'язання відповідних задач. Другий – це застосування вже наявних інструментів для розв'язування прикладних задач збирання та аналізу даних щодо конкретних складних систем. У цій статті ми розглядаємо проблему другого типу щодо здатності поширених інструментів GROK 3 та ChatCPT 4

вирішувати подібні проблеми стосовно даних про вищу освіту України, країн ЄС і деяких інших країн.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1,2] проаналізовано статистичні показники мережі закладів вищої освіти, фінансування, охоплення вищою освітою в Україні порівняно із країнами ЄС та ОЕСР за даними Державної служби статистики України та статистичних даних Євростат, ОЕСР, ЮНЕСКО та деяких інших джерел. Аналіз даних про мережу закладів вищої освіти України також було надано в [3,4]. Складні та суперечливі проблеми застосування штучного інтелекту у дослідженнях аналізуються у статті [5,6]. З одного боку, штучний інтелект розглядається як трансформаційна сила, яка може революціонізувати процеси проведення досліджень, мислення й написання академічних текстів, партнер в інтелектуальних пошуках, здатний усунути упередження та розширити людські здібності. З іншого боку – обговорюються питання меж впливу штучного інтелекту, пов'язані з його використанням етичні, епістемологічні та онтологічні проблеми. У роботі [7] зроблено огляд публікацій 2007-2018 р., які свідчать, що принаймні у сфері STEM освіти, інструменти штучного інтелекту можуть бути корисні для опрацювання наявної в різних джерелах інформації з метою персоналізації навчання, прогнозування його результатів, більш об'єктивного оцінювання тощо. Автори огляду [8] на підставі аналізу великої кількості інших досліджень останніх років роблять висновок, що використання штучного інтелекту може збільшити знання про процеси, які проявляються в освіті на національному, регіональному та локальному рівнях, допомагаючи сформулювати політику та розподілити ресурси для характеристик, визначених як важливі для ефективності освіти (макроперспектива). Водночас, можливі більш конкретні дослідження окремих учнів, вчителів і шкіл (мікроперспектива), орієнтовані на персоналізацію навчання, вдосконалення педагогічних стратегій, прогнозування короткострокових наслідків тих чи інших дій тощо. Значна частина публікацій присвячена впливу штучного інтелекту взагалі чи конкретних інструментів на успішність та результати навчання на різних рівнях освіти. Водночас, у прикладних дослідженнях недостатньо уваги приділено оцінюванню достовірності, надійності та релевантності результатів, отриманих за допомогою штучного інтелекту, зокрема таких інструментів, як GROK 3 та ChatCPT 4.

Мета дослідження: формулювання окремих рекомендацій щодо застосування інструментів штучного інтелекту GROK 3 та ChatCPT 4 для розв'язування деяких типових задач збирання та аналізу даних великого обсягу і складної структури на прикладі даних про системи вищої освіти різних країн.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для проведення дослідження було обрано декілька актуальних задач, що можуть розглядатися як типові при проведенні прикладних досліджень освітніх систем, а саме:

– збирання даних щодо кількості студентів у закладах вищої освіти країн ЄС, Австралії, Канади, США і Японії та оцінювання основних статистичних характеристик відповідних розподілів;

– збирання даних щодо фінансування здобуття вищої освіти у розрахунку на студента у закладах вищої освіти країн ЄС, Австралії, Канади, США і Японії та оцінювання основних статистичних характеристик відповідних розподілів;

– збирання даних щодо показників залучення громадян до здобуття вищої освіти.

Варто зазначити, що зазначені задачі не є змістовно складними для фахівців. Основні складності полягають у тому, що не існує єдиних, актуальних та стандартизованих наборів відповідних даних. Наявні дані розпорошені по різних джерелах та можуть стосуватися різних років і мати особливості, що відображають специфічні особливості різних країн, зумовлені методиками збирання первинних даних, відмінностями термінології тощо. GROK 3 та ChatGPT 4 використовують істотно різні підходи до розв’язування таких задач. Як приклад розглянемо відповіді на Запитання 1: «Please give me a table containing such data (by country) for USA, Canada, Japan, Australia and each of EU countries: number of higher education institutions, mean and median values of number of students in institutions of relative country, standard deviations for these distributions, and minimum/maximum values of number of students».

Як GROK 3 так і ChatGPT 4 надають відповідь протягом кількох секунд, але відповідь GROK 3 є значно більш повною та змістовною. Вона також викликає більшу довіру, зокрема і через те, що краще описана методика, використано більш актуальні дані, а наведені у відповіді результати збігаються з результатами вибіркової ручної перевірки. Крім того, GROK 3 додає посилання на сайти або сторінки, звідки було взято вихідну інформацію.

У відповіді на це запитання GROK 3 наводить таблицю запрошених даних, а також додаткову інформацію по методиках та джерелах даних. На рис. 1 наведено фрагмент таблиці з відповіді GROK 3.

Table: Higher Education Institutions Data (Approximate)

Country	# of Institutions	Mean Students	Median Students	Std. Deviation	Min Students	Max Students
USA	3,228 (2019)	9,000	5,000	15,000	100	200,000
Canada	223 (2023)	12,000	8,000	10,000	200	80,000
Japan	784 (2023)	6,000	4,000	8,000	150	50,000
Australia	172 (2023)	15,000	10,000	12,000	300	70,000
EU Countries						
Austria	70 (2022)	5,000	3,500	6,000	100	40,000
Belgium	45 (2022)	8,000	6,000	7,000	150	50,000

Рисунок 1 - Фрагмент відповіді GROK 3 на запитання 1

Зокрема, зазначено, що під вищою освітою розуміються ступеневі програми, які відповідають 5-8 рівням Міжнародної стандартної класифікації освіти. Згідно з відповіддю, дані про кількість закладів отримано з відкритих баз Інституту статистики

ЮНЕСКО та ОЕСР, а також з даних національної статистики. З них використано останні доступні на дату запиту (08.04.2025) дані, які переважно стосуються 2023-2024 років. Середні значення отримано як відношення загальної кількості студентів до кількості ЗВО. Медіанні значення (середнє значення), де це можливо, оцінені за доступними розподілами або з урахуванням типовій для освітніх систем асиметрії розподілу. Стандартні відхилення у більшості випадків недоступні і оцінювалися на основі загальних тенденцій варіабельності, приміром, співвідношення кількості великих і малих закладів. Так само оцінювали мінімальний та максимальний обсяги, якщо точні дані не були доступні. GROK 3 також надає додаткову інформацію по країнах. Приміром, зазначено, що для США розподіл спотворюють деякі великі університети, як університет Аризони; дані по кількості університетів стосуються 2019 р., а дані по кількості студентів – 2023 р. У відповіді зазначено особливості, що могли вплинути на точність оцінок та на зіставність результатів по окремих країнах. Це стосується неповноти даних по окремих країнах, статичності даних у джерелах інформації, різних визначень закладу вищої освіти.

Слід зазначити, що GROK 3 намагається мінімізувати обсяг своєї роботи, якщо це дозволяє формулювання завдання. Зокрема, при заміні у завданні «each of EU countries» на «EU countries» у відповіді було наведено результати лише по декількох країнах ЄС. Дані, що є у інтегрованих статистичних базах GROK 3 бере з них. При цьому інколи він користується не первинними базами Євростат, ОЕСР тощо, а вторинними джерелами, що беруть інформацію з цих баз. Зазвичай це не створює проблем.

Відповідь ChatGPT 4 на те саме запитання є досить лаконічною. В ній також, як і у відповіді GROK 3, повідомляється про неповноту даних по окремих країнах, відмінності в методах збирання даних, звітних періодах і визначеннях ЗВО. На рис. 2 наведено фрагмент відповіді, яку ChatGPT 4 навів у текстовому, а не у табличному (тобто не відповідно до запиту) форматі.

Аналогічні відповіді ChatGPT 4 надав по США і Канаді. При цьому варто зазначити, що для цих країн було наведено не розраховані за актуальними даними середні значення кількості студентів у ЗВО, а наявні у базі історичні дані кінця 1980х – початку 1990-х років безпосередньо про середні значення.

Запитані результати по країнах ЄС Chat GPT 4 не надав, посилаючись на недоступність вичерпних та уніфікованих даних. Натомість він порадив проконсультуватися з відповідними національними міністерствами освіти або статистичними агентствами кожної країни ЄС. Судячи з відповідей, Chat GPT 4 спочатку намагався знайти у своїй базі готові дані про запитувані показники для будь-якого року і лише за їх відсутності намагався додатково виконати найпростіші розрахунки (середні арифметичні для Японії та Австралії). Більш складні розрахунки він не намагався виконувати.

Аналогічною є ситуація при відповіді на запитання «Please give me following data (by country) in tabular format for Ukraine, the USA, Canada, Japan, Australia and each EU country in 1990, 2000, 2010, 2020: gross enrolment ratio in tertiary education; share of citizens aged 25-34 with a bachelor's degree or higher». Це завдання є більш простим, оскільки переважна більшість запитаних даних у розрізі зазначених країн та років є у великих

статистичних базах Євростат, ОЕСР, Інституту статистики ЮНЕСКО та Світового банку.

GROK 3 надає таблицю запитаних даних, що містить окремі пропуски (12,9% від загальної кількості, з яких майже всі стосуються 1990 р.). Наведені дані є близькими до даних інших джерел. Також майже повною є відповідь на додаткове запитання про відсотки громадян, що мають ступінь бакалавра і ступінь магістра у віковій групі 25-34 роки. Як і у попередньому випадку GROK 3 наводить джерела інформації (переважно зазначені вище великі бази), окремі коментарі до результатів і додаткові дані. Зокрема, вказано, що агреговані дані по ЄС, які надані додатково до даних по країнах, для 1990 та 2000 р. не враховують відсутні дані по окремих країнах, що окремі спеціально позначені дані є оцінками, отриманими екстраполяцією, що для Японії замість неповних даних 2020 р. наведено дані за 2019 р., тощо.

**Japan:**

- **Number of Higher Education Institutions:** As of May 1, 2020, Japan had 795 universities. [citeturn0search4](#)
- **Total Student Enrollment:** In 2023, approximately 2.95 million students were enrolled in universities. [citeturn0search5](#)
- **Average Number of Students per Institution:** Based on 2023 data, the average is approximately 3,710 students per university.

**Australia:**

- **Number of Higher Education Institutions:** As of recent reports, Australia has 43 universities, comprising 37 public and 6 private institutions. [citeturn0search19](#)
- **Total Student Enrollment:** In 2021, there were 1,185,450 students attending university or other higher education institutions. [citeturn0search16](#)
- **Average Number of Students per Institution:** Approximately 27,570 students per university, based on 2021 data.

**European Union (EU) Countries:** Comprehensive and uniform data across all EU member states are not readily available due to differing data collection standards and reporting

Рисунок 2 - Фрагмент відповіді ChatGPT 4 на запитання 1

Натомість Chat GPT 4 взагалі не перевіряє зазначені великі бази, що може бути зумовлено відсутністю доступу до актуальної інформації через Інтернет і необхідністю обсягу оптимізації інформації, що зберігається у локальній базі. Тож не дивно, що єдиними результатами, які були видані, є оцінки GER для України для 2010 та 2020 р., які є дещо відмінними, але близькими до відповідних даних GROK 3. У всіх інших випадках було зазначено, що дані відсутні.

Аналогічною є ситуація із відповіддю на запитання: «Please give me a table containing such data (by country) for USA, Canada, Japan, Australia and each EU countries : number of higher education institutions, mean and median values (in nominal USD per stu-

dent) of general, public and private funding in institutions of relative country, standard deviations for these distributions, and minimum/maximum values of such funding». GROK 3 надає повну інформацію, яка у частині середніх по країнах даних є близькою до даних інших джерел. Chat GPT 4 надає суперечливі відповіді на це запитання.

#### **Висновки:**

1. Результати дослідження свідчать про те, що GROK 3 та ChatGPT 4 дають змогу істотно прискорити і спростити виконання рутинних етапів збирання та попереднього аналізу даних великого обсягу та складної структури при дослідженні освітніх систем.

2. Характерні для освітніх систем неповнота даних по різних країнах та роках, різні структури та методики збирання/розрахунку подібних даних, відмінності термінології тощо створюють ризики недостовірності, ненадійності і нерелевантності результатів роботи штучного інтелекту. Для GROK 3 порівняно з ChatGPT 4 ці ризики є значно меншими, оскільки він без додаткових запитань наводить у відповіді інформацію про методологічні проблеми і пов'язані з ними застереження. Втім, навіть і в цьому випадку варто робити верифікацію його даних їх зіставленням з відомими або отриманими в інший спосіб даними.

3. Деякі проблеми ChatGPT 4, очевидно, пов'язані з тим, що він не має доступу до актуальних даних мережі Інтернет і працює з даними локальної бази. Такі дані необхідно оптимізувати з метою забезпечення можливості надання «хороших» відповідей на запитання, які за прогнозами будуть найбільш масовими. Але через це знижується якість виконання вузькоспеціальних завдань. Зокрема, інколи ChatGPT 4 витрачає час на пошук інформації в нерелевантних базах, а в інших випадках не знаходить інформацію, наявну у таких популярних джерелах, як бази Євростат, ОЕСР, Інституту статистики ЮНЕСКО, Світового банку.

4. GROK 3 містить більше інструментів попередньої обробки даних. Тому він самостійно розраховує або оцінює окремі показники описової статистики за наявності навіть неповних вибірок. ChatGPT 4 зазвичай бере лише наявні в джерелах готові дані, навіть, якщо вони дуже застарілі. Єдиний вид розрахунків, який він в окремих випадках виконував у розглянутих прикладах – це визначення середнього арифметичного діленням сумарного (по країні) значення показника на кількість закладів.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Бахрушин В.Є. Модернізація мережі закладів вищої освіти України: Деякі євроінтеграційні аспекти. Освітня аналітика України, 2023, № 5, с. 112-125. URL:

<https://doi.org/10.32987/2617-8532-2023-5-112-125>

2. Бахрушин В.Є. Особливості фінансування вищої освіти в Україні порівняно з іншими країнами. В кн. «Удосконалення фінансування системи освіти України як передумова успішного реформування: монографія / за ред. С. Л. Лондара; ДНУ «Інститут освітньої аналітики». Київ, 2021, с. 251-264.

URL: [https://iea.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/monograph\\_20212\\_fin.pdf](https://iea.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/monograph_20212_fin.pdf)

3. Кремень В. Г., Луговий В. І., Саух П. Ю., Таланова Ж. В. Мережа державних закладів вищої освіти України: аналітичний огляд конкурентоспроможності. Вісник

Національної академії педагогічних наук України, 2022, Т. 4, № 1, С. 1-8.  
URL:<https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4122>

4. Калашнікова С., Оржель О. Оптимізація мережі закладів вищої освіти: теоретичні особливості та практичні рекомендації. *Університети і лідерство*. 2022. № 13. С. 89–129. URL: <https://doi.org/10.31874/2520-6702-2022-13-89-129>

5. Butson, R., & Spronken-Smith, R. AI and its implications for research in higher education: a critical dialogue. *Higher Education Research & Development*, 2024, 43(3), 563–577. <https://doi.org/10.1080/07294360.2023.2280200>

6. Bond, M., Khosravi, H., De Laat, M. et al. A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: a call for increased ethics, collaboration, and rigour. *Int. J. Educ. Technol. High Educ.*, 2024, 21:4, 41 p. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z>

7. Zawacki-Richter, O., Marín, V.I., Bond, M. et al. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *Int. J. Educ. Technol. High Educ.*, 2019, 16:39, 27 p. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>

8. de Souza Zanirato Maia, J.; Bueno, A.P.A.; Sato, J.R. Applications of Artificial Intelligence Models in Educational Analytics and Decision Making: A Systematic Review. *World*, 2023, 4, 288-313. <https://doi.org/10.3390/world4020019>

#### REFERENCES

1. Bakhrushyn V. Modernization of the network of higher education institutions in Ukraine: some aspects of European integration, 2023, № 5, p. 112-125. <https://doi.org/10.32987/2617-8532-2023-5-112-125>

2. Bakhrushyn V. Features of financing higher education in Ukraine compared to other countries. In «Improving the financing of the education system of Ukraine as a prerequisite for successful reform»: monograph / Ed. S.D. Londar; State Scientific Institution “Institute of Educational Analytics”. Kyiv, 2021, p. 251-264.

URL: [https://iea.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/monograph\\_20212\\_fin.pdf](https://iea.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/monograph_20212_fin.pdf)

3. Kremen V., Lugovyi V., Saukh P., Talanova Z. Network of state higher education institutions in Ukraine: an analytical review of competitiveness. *Herald of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine*, 2022, Vol. 4, № 1, p. 1-8.

<https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4122>

4. Kalashnikova S., Orzhel O. Optimization of the Network of Higher Education Institutions: Theoretical Features and Practical Recommendations. *International Scientific Journal of Universities and Leadership*. 2022. № 13. p. 89–129. DOI: <https://doi.org/10.31874/2520-6702-2022-13-89-129>

5. Butson, R., & Spronken-Smith, R. AI and its implications for research in higher education: a critical dialogue. *Higher Education Research & Development*, 2024, 43(3), 563–577. <https://doi.org/10.1080/07294360.2023.2280200>

6. Bond, M., Khosravi, H., De Laat, M. et al. A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: a call for increased ethics, collaboration, and rigour. *Int. J. Educ. Technol. High Educ.*, 2024, 21:4, 41 p. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z>

7. Zawacki-Richter, O., Marín, V.I., Bond, M. et al. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *Int. J. Educ. Technol. High Educ.*, 2019, 16:39, 27 p. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>

8. de Souza Zanirato Maia, J.; Bueno, A.P.A.; Sato, J.R. Applications of Artificial Intelligence Models in Educational Analytics and Decision Making: A Systematic Review. World, 2023, 4, 288-313. <https://doi.org/10.3390/world4020019>

Received 15.05.2025.  
Accepted 21.05.2025.

***Application of artificial intelligence tools for data search and preliminary analysis in applied research of education systems***

*The article outlines the problems of using popular artificial intelligence tools GROK 3 and ChatCPT 4 for collecting data on educational systems available on the Internet, their pre-processing and analysis. A significant proportion of recent publications is devoted to the development of new artificial intelligence tools, the study of algorithms of its work, methodological and ethical problems of its application in various fields, the impact of artificial intelligence in general or of specific tools on academic success and learning outcomes at different levels of education. At the same time, applied research has not paid enough attention to assessing the validity, reliability, and relevance of results obtained using artificial intelligence, in particular such tools as GROK 3 and ChatCPT 4.*

*For this study, several problems of educational systems researches, which can be considered as relevant also in broader contexts, were selected. The main attention was paid to the issues of collecting and preliminary statistical analysis of data on the number of students in higher education institutions, funding of higher education, and indicators of youth involvement in higher education.*

*It has been shown that both tools significantly speed up and simplify the implementation of routine research stages, but GROK 3 allows to obtain more complete, reliable and high-quality data, which may be due to both the ability to access current data on the Internet and differences in algorithms. ChatCPT 4 is usually limited to providing a small amount of the requested data present in its database, which is sometimes very outdated. The advantage of GROK 3 is also that it collects not only the requested numerical data from various types of sources, but is also able to independently calculate simple statistical characteristics of samples, such as mean values, medians, standard deviations, minimum and maximum values, from the primary data without additional questions, including the ability to make plausible estimates from incomplete, highly asymmetric samples. Nevertheless, in this case too, the general methodology should provide for verification of the results of artificial intelligence, in particular by comparing them with other known data.*

**Бахрушин Олексій Володимирович** – аспірант кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка».

**Бахрушин Володимир Євгенович** – д.ф.-м.н., професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики Національного університету «Запорізька політехніка».

**Bakhrushyn Oleksiy Volodymyrovych** – postgraduate student of the Department of Software Tools of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”.

**Bakhrushyn Volodymyr Yevgenovych** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of System Analysis and Computational Mathematics of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”.

І.Р. Поворотня, О.А. Сафронова, Р.В. Подольський, Г.А. Кононенко

## ОПТИМАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ Mn/Si ДЛЯ КОРИГУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ

*Анотація.* У проведеній роботі представлено комплексний підхід пошуку оптимального складу сталі в межах відомих марок на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку. Даний підхід дозволив враховувати сумарний хімічний склад та аналізувати характер взаємодій між елементами на рівні міжатомних зв'язків, що є критичним для прогнозування властивостей кінцевого матеріалу. Концепція спрямованого хімічного зв'язку базувалась на уявленнях про здатність окремих елементів до електронного перерозподілу в розплаві, що, у свою чергу, впливає на структуру та стабільність системи. Метою дослідження було визначення впливу варіацій у вмісті основних матричних елементів — вуглецю, кремнію та марганцю — на зарядовий стан системи, що представлений узагальненим параметром  $Z^Y$ . Цей параметр відображає міру хімічної збалансованості сплаву та є індикатором стабільності електронної будови розплаву. В результаті досліджено чутливість системи до співвідношення Mn/Si як до показника, що визначає електронну та структурну рівновагу. Таким чином, для підвищення параметру  $Z^Y$ , збільшення якого призводить до підвищення твердості, необхідно віддавати перевагу збільшенню марганцю після значення Mn/Si на рівні 2,8-3,2, а до цього інтервалу — за рахунок збільшення вмісту кремнію. Співвідношення марганцю до кремнію (Mn/Si) має перебувати в межах 2,8–3,2. При цьому зростання значення Mn/Si понад 3,2 зумовлює домінування впливу марганцю, що може порушити баланс, таким чином, контроль вмісту легувальних елементів, особливо кремнію та марганцю, є важливою умовою формування сталей із прогнозованими властивостями. Результати проведеного моделювання підкреслюють доцільність використання розрахункових підходів у матеріалознавстві. Прогнозне моделювання дозволяє ще на етапі створення хімічного складу сталі забезпечити ефективну адаптацію її структури під задані експлуатаційні характеристики, що сприяє зниженню затрат на експериментальні розробки та скороченню термінів виведення нових сплавів у виробництво.

*Ключові слова:* залізнична вісь, прогнозне моделювання, кремній, марганець, механічні властивості, хімічний склад.

**Вступ.** Зазвичай сталі з вмістом вуглецю від 0,40 до 0,60 % використовують для виробництва залізничних коліс і осей. До їх складу вводять легуючі елементи, такі як хром (Cr), марганець (Mn), молібден (Mo) і нікель (Ni), що підвищує прогартовуваність

і покращує можливість термічної обробки, зокрема забезпечує високе зміцнення та стійкість до знеміцнення під час відпуску [1-2]

Додавання марганцю, нікелю, хрому та молібдену позитивно впливає на зносостійкість сталі. Водночас їхній вміст слід контролювати з урахуванням економічних і технологічних чинників розробки матеріалу.

Марганець підвищує міцність і покращує прогартовуваність сталі. При вмісті до 2% (мас.) спостерігається зростання тимчасового опору розриву, тоді як підвищення границі плинності відзначається лише до концентрації 1,5% (мас.). Водночас ударна в'язкість знижується зі збільшенням вмісту марганцю, особливо при перевищенні 1,5% (мас.) [3].

Кремній в концентрації до 0,8 – 1,2 % мас. позитивно впливає на структуру, механічні та технологічні властивості сталі: знижує критичну швидкість охолодження і збільшує прогартовуваність, зменшує швидкість розпаду мартенситу, підвищує міцність, твердість і пружні властивості сталі, збільшує опір корозії, але знижує в'язкість за більшого вмісту. Такий вплив кремнію на властивості пов'язаний з його дією на матричну фазу ( $\alpha$ -розчин) і карбіди [4].

Зміна вмісту вуглецю, який є одним з основних елементів системи Fe-C у сталі призводить до зростання міцності (твердості, границі плинності, тимчасового опору), але з підвищенням його кількості в сталі знижуються значення пластичних характеристик та ударної в'язкості [5].

Враховуючи особливості діапазонів хімічного складу в рамках марочного є значна важкість не тільки у відтворенні різних комбінацій хімічного складу, але і в визначенні оптимальних комбінацій введення хімічних елементів, їх засвоєння та вплив на кінцеві механічні властивості. Застосування концепції спрямованого хімічного зв'язку дозволяє на етапі розрахунків виявляти оптимальні співвідношення легуючих елементів, що забезпечують бажані фізико-хімічні властивості сплаву. Це дозволяє суттєво скоротити обсяг експериментальних досліджень та знизити витрати на створення нових матеріалів з покращеними характеристиками.

**Мета роботи.** Дослідження впливу зміни вмісту матричних елементів, а саме вуглецю, кремнію та марганцю на параметр зарядового стану системи – ZY з застосуванням розрахункового експерименту. Розробити рекомендації щодо вмісту основних компонентів вуглецевої сталі для досягнення високої твердості за можливо меншої кількості обробок.

**Методика проведення досліджень.** Комплексний пошук оптимального складу в межах відомих марок сталей, проведений у дослідженні, базується на концепції спрямованого хімічного зв'язку. Ця концепція розглядає металевий розплав як хімічно цілісну систему та включає факторний аналіз із побудовою моделей для досягнення необхідної рівномірної структурної складової. Оскільки фазові перетворення зумовлені міжатомною взаємодією у багатокомпонентному розплаві, на першому етапі розрахункових досліджень виконується згортка хімічного складу. Це здійснюється шляхом використання інтегральних параметрів стану заряду ( $Z^Y$ ) та структури (d), які обчислюються

як результат попарної взаємодії всіх  $m$  компонентів через розв'язання системи нелінійних рівнянь у кількості  $m^2 - m + 1$  [6].

В даній роботі досліджували вплив зміни вмісту компонентів в межах трьох марок сталі для залізничних осей: марка ОС (український стандарт ДСТУ 31334:2009), марка сталі EA1N (європейський стандарт EN 13261:2020), марка F (американський стандарт AAR M-101-2017). Хімічний склад цих сталей наведений в таблиці 1. У випадку, коли нормативні вимоги містять лише максимальні обмеження, для досліджуваних елементів (вуглець, кремній, марганець) як мінімальний вміст задавались значення, які відповідали мінімальним фактичним, відповідно до поточного контролю у промисловому виробництві. Для інших елементів брали фіксовано максимальний припустимий вміст.

Таблиця 1

Хімічний склад сталей, що подавались на розрахунок

Марка сталі	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	V
EA1N	0,34-0,40	0,80-1,20	0,18-0,50	0,020	0,015	0,3	0	0,3	0,08	0
ОС	0,42-0,50	0,60-0,90	0,15-0,35	0,040	0,04	0,3	0,25	0	0	0
F	0,45-0,59	0,70-1,00	0,15-0,45	0,045	0,05	0	0,30	0	0	$\leq 0,08$

**Результати досліджень.** Розрахунок для сталі марки EA1N здійснювали від мінімального до максимального значення згідно вказаного у таблиці вмісту з відповідним кроком (C з кроком 0,006; Mn з кроком 0,044; Si з кроком 0,035). Вибір саме такого кроку спричинений створенням однакової кількості вимірів для усіх варіантів розрахунку задля забезпечення об'єктивності дослідження. При зміні вмісту вуглецю, вміст марганцю та кремнію брали рівним середньому значенню. У разі зміни марганцю, фіксували на середньому рівні вуглець та кремній. А для зміни кремнію, на середньому рівні зазначали вуглець та марганець.

В результаті застосованих умов було встановлено у попарних зв'язках  $Z^Y - C$ ;  $Z^Y - Mn$ ;  $Z^Y - Si$  - тісний зв'язок з високими коефіцієнтами детермінованості ( $R^2=0,99$ ), що представлено на рис.1, а .

Поряд з зазначеними видами зв'язків цінну інформацію несуть графічні зображення, які будуються з приведенням інтервалу значень досліджуваних змінних до єдиного відрізка  $[0 \div 1]$  рис.2, б. Оскільки саме таким способом підвищується наочність виявлених впливів, читабельність одразу декількох змінних та співставлення спрямованості впливу однієї змінної відносно іншої. Так найбільший вплив на зростання значень параметру  $Z^Y$  має кремній, потім марганець, а вуглець дещо понижує  $Z^Y$  у порівнянні з впливом Mn і Si.

З результатами попередніх досліджень було визначено, що за значень зарядового стану системи в інтервалі  $1,2 \leq Z^Y \leq 1,21$  відбувається зміна стану, який забезпечує більш високий рівень твердості: до цього інтервалу більша твердість у стані після гарячої пластичної деформації не менше 50% (ГПД), після зазначеного інтервалу – у стані після наступної термічної обробки (ТО) – нормалізації [7]. Тобто для сталей зі складом відповідно до марки EA1N ця точка знаходиться в області поза інтервалом  $1,2 \leq Z^Y \leq 1,21$ , що свідчить про необхідність проведення термічної обробки для підвищення твердості (рис. 1).

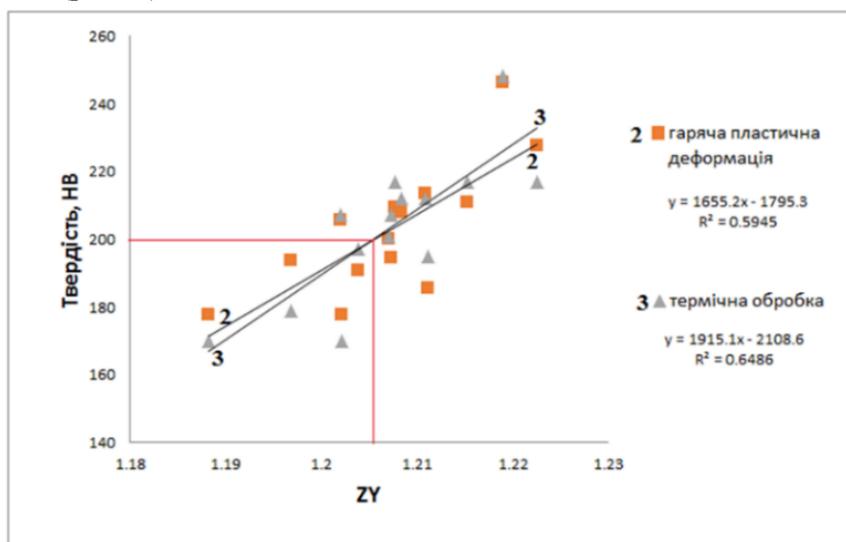


Рисунок 1 – Визначення значення параметру  $Z^Y$ , за якого змінюється вплив обробки на рівень твердості зразків дослідної сталі лабораторного виготовлення [7]

Значення  $Z^Y$  більші за 1,21 для всіх варіантів хімічного складу сталі в межах вимог до цієї марки. Таким чином, висновок про можливу відмову від проведення нормалізації після гарячої пластичної обробки, є незастосовуваним для цих сталей. Разом з тим, результати досліджень дозволили встановити, що інтенсивність впливу вуглецю, кремнію та марганцю різна. За вмісту цих елементів на рівні 0,5-0,6 у приведених координатах відбувається (рис.2, б) зміна: до цього значення найбільш ефективним елементом, який впливає на значення  $Z^Y$  є вуглець, після цього значення, провідну роль вже відіграють концентрації кремнію та разом з ним марганцю. Оскільки за збільшення  $Z^Y$  відбувається збільшення твердості, то для сталі марки EA1N може бути рекомендовано досягати ефективного збільшення твердості збільшенням вмісту вуглецю до його значень на рівні 0,37- 0,376%, у подальшому стає більш ефективним з точки зору підвищення твердості збільшення вмісту кремнію та марганцю до максимальних значень в межах марочного складу.

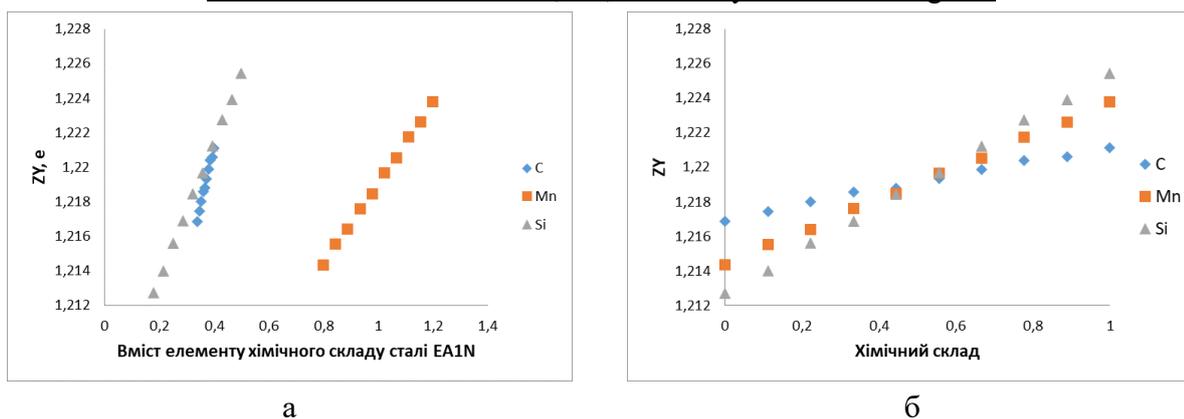


Рисунок 2- Взаємозв'язок зарядового стану системи -  $Z^Y$  з елементами хімічного складу сталі марки EA1N (а); вплив матричних елементів (C; Mn; Si) на зміну параметра міжатомної взаємодії -  $Z^Y$  (б)

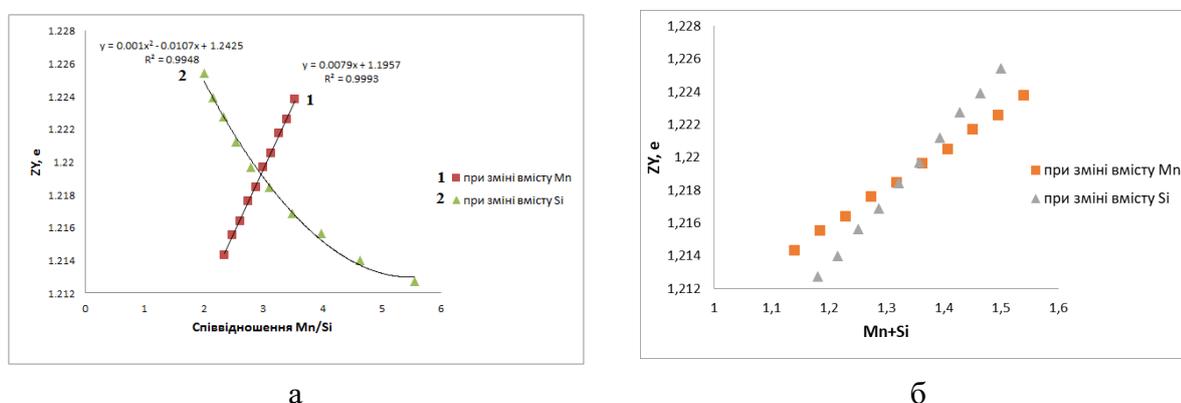


Рисунок 3– Взаємозв'язок зарядового стану сталі EA1N з співвідношенням Mn/Si (а); Взаємозв'язок зарядового стану сталі EA1N з (Mn+Si) (б)

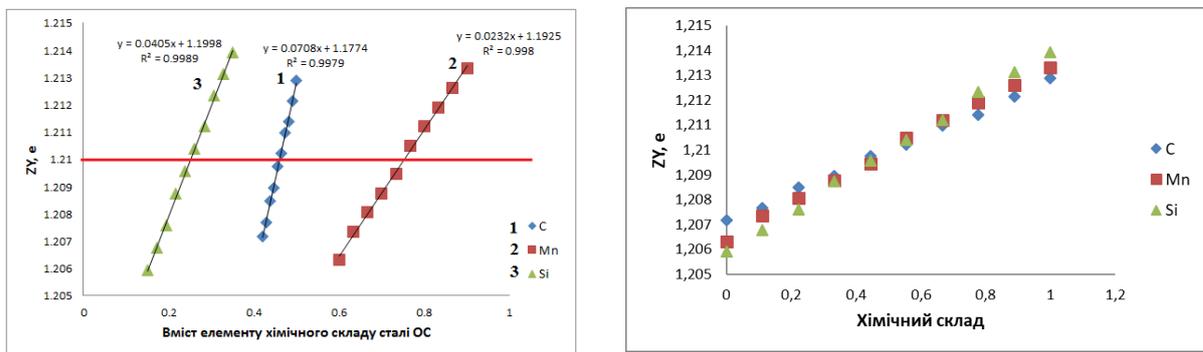
При дослідженні впливу Mn/Si для сталі марки EA1N встановлено, що за значення цього параметру на рівні 2,8-3,2 відбувається зміна найбільш інтенсивного впливу співвідношення елементів на  $Z^Y$  сталі. До цього значення найбільший вплив та спадаючий характер функції носить збільшення параметру Mn/Si за рахунок зміни марганцю, а за подальшого збільшення Mn/Si вже стає більш ефективним збільшення вмісту марганцю, який має зростаючий характер. Таким чином, для підвищення параметру  $Z^Y$ , збільшення якого призводить до підвищення твердості, необхідно віддавати перевагу збільшенню марганцю після значення Mn/Si на рівні 2,8-3,2, а до цього інтервалу – за рахунок збільшення вмісту кремнію. При цьому найбільші й найменші значення  $Z^Y$  досягаються при зміні вмісту саме кремнію в межах марочного складу сталі. Як виходить з аналізу рис. 3а, для досягнення найбільших значень  $Z^Y$ , збільшення якого призводить до збільшення твердості, в сталі марки EA1N необхідно використовувати максимальний вміст кремнію в межах марочного за середніх значень марганцю та вуглецю. Трохи менших значень  $Z^Y$ , а як наслідок і твердості, можна отримати за максимального вмісту марганцю та середніх значень вуглецю та кремнію.

В результаті дослідження впливу сумарного вмісту кремнію та марганцю на зарядовий стан сталі (рис. 3, б) встановлено, що в інтервалі значень 1,32-1,38 відбувається зміна провідного елементу, що впливає на цей параметр. До вказаного інтервалу найбільший вплив чинить зміна вмісту марганцю, після цього інтервалу – кремнію. Оскільки головна мета досліджень – визначити умови, за яких досягається найбільші значення твердості, а вони відповідають найбільшим значенням параметру  $Z^Y$ , то можна рекомендувати дотримуватись наступних принципів: вміст вуглецю доцільно підвищувати до 0,37-0,38 %, подальше підвищення призведе також до підвищення твердості, але більш ефективним є керування вмістом марганцю та кремнію; вміст кремнію має бути максимальним в межах марочного (0,5%), при цьому вміст марганцю має бути на рівні середнього (1,0%). Такий вміст марганцю та кремнію також відповідає найвищим значенням параметру  $Z^Y$  (лінія 2 – за середнього значення марганцю, вуглецю та зміні вмісту кремнію) відповідно до рис. 3, який графічно відображає залежність зарядового стану системи від співвідношення марганцю до кремнію. Термічна обробка після гарячої пластичної деформації необхідна для підвищення твердості.

Розрахунок для сталі марки ОС. Хімічний склад досліджуваної сталі ОС відповідає хімічному складу, зазначеному у стандарті ДСТУ 31334:2009.

Зміна матричних елементів здійснювалась від мінімального до максимального значення згідно вказаного у таблиці 1 вмісту з відповідним кроком (C з кроком 0,008; Mn з кроком 0,033; Si з кроком 0,022).

Сталь марки ОС частково входить у вказаний інтервал  $1,2 \leq Z^Y \leq 1,21$ , а саме нижче червоної лінії на рис.4 дані задовольняють вказану вимогу. Тобто для сталей, хімічний склад яких відповідає умові, додаткова термічна обробка (нормалізація) може не призводити до суттєвого збільшення твердості порівняно зі станом після гарячої пластичної деформації. Усі елементи матричної системи у конкретному випадку для сталі марки ОС призводять до зростання значень параметру  $Z^Y$ . Можна бачити з рис. 4, б, що інтенсивність впливу елементів на параметр  $Z^Y$  близька, не відбувається зміни найбільш ефективного параметру.



а

б

Рисунок 4– Взаємозв’язок зарядового стану системи -  $Z^Y$  з елементами хімічного складу сталі марки ОС (а); вплив матричних елементів (C; Mn; Si) на зміну параметра міжатомної взаємодії -  $Z^Y$  (б)

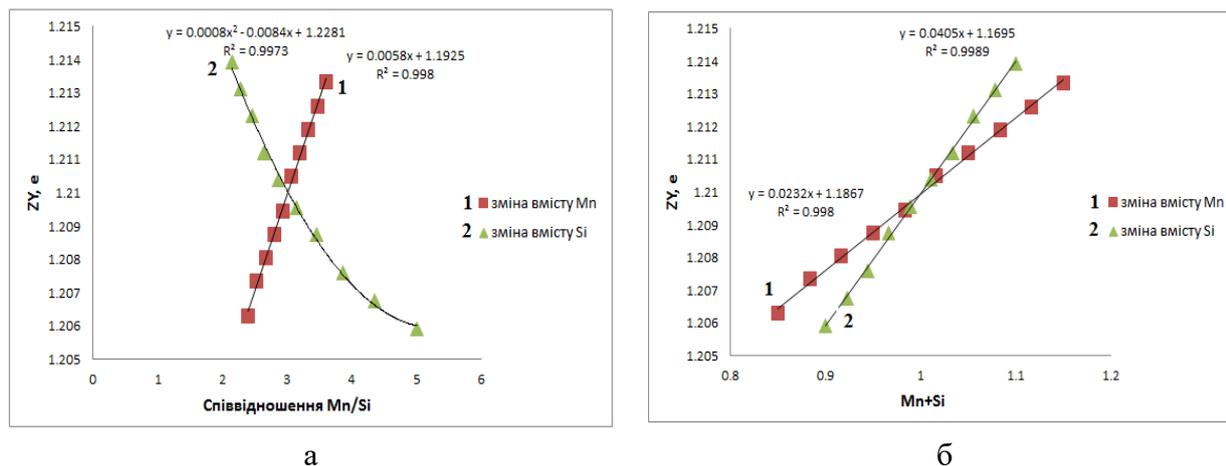


Рисунок 5 – Взаємозв'язок зарядового стану сталі ОС:  
а) з співвідношенням Mn/Si; б) з (Mn+Si)

В результаті проведеного математичного експерименту встановлено, що за значень Mn/Si для сталі марки ОС на рівні 2,8-3,2 (так само, як і для попередньо аналізованої сталі EA1N) відбувається зміна найбільш інтенсивного впливу співвідношення елементів на  $Z^Y$  сталі. До цього значення найбільший вплив та спадаючий характер функції носить збільшення параметру Mn/Si за рахунок зміни кремнію, а за подальшого збільшення Mn/Si вже стає більш ефективним збільшення вмісту марганцю, який має зростаючий характер. Таким чином, для підвищення параметру  $Z^Y$ , збільшення якого призводить до підвищення твердості, необхідно віддавати перевагу збільшенню марганцю після значення Mn/Si на рівні 2,8-3,2, а до цього інтервалу – збільшенню вмісту кремнію. Найбільші значення параметру  $Z^Y$  спостерігали за змінювання кремнію при постійних середніх значеннях вуглецю та марганцю, ця закономірність з високою точністю ( $R^2=0,997$ ) описується параболічною функцією.

В результаті дослідження впливу сумарного вмісту кремнію та марганцю на зарядовий стан сталі марки ОС встановлено, що в інтервалі значень 0,98-1,02 відбувається зміна провідного елементу, що впливає на цей параметр. До вказаного інтервалу найбільший вплив чинить зміна вмісту марганцю, після цього інтервалу – кремнію. Задля досягнення максимальних значень твердості (які спостерігається за високих значень параметру  $Z^Y$ ) залізничних осей марки ОС рекомендовано дотримуватись наступних підходів: виходячи з аналізу рис. 4 та 5 вміст кремнію має бути наближеним до максимального в межах марочного (0,35%), при цьому вміст вуглецю та марганцю може бути на середньому рівні (0,75% марганцю та 0,46% вуглецю). Подальше збільшення вуглецю і марганцю також може дати певний приріст твердості, однак їх вплив не має високої ефективності. Важливо відзначити, що за хімічного складу сталі для якого параметр  $Z^Y$  відповідає діапазону 1,20-1,21 вплив термічної обробки (рис. 1) на твердість відсутній. Тому, з точки зору забезпечення максимального рівня твердості за мінімальної кількості обробок, для сталей з хімічним складом, який відповідає вказаній умові (рис. 5, нижче червоної лінії) можна не проводити термічне оброблення після гарячої пластичної деформації. Рівень червоної лінії відповідає середнім значенням вмісту елементів.

Таким чином, за зменшення вмісту кремнію з максимального до середнього є можливість відмовитись від цілого етапу виготовлення осі – термічного оброблення, при цьому твердість матиме задовільний рівень.

Розрахунок для сталі марки F. Хімічний склад досліджуваної сталі F відповідає хімічному складу, зазначеному у стандарті.

Зміна матричних елементів здійснювалась від мінімального до максимального значення згідно вказаного у таблиці 1 вмісту з відповідним кроком (C з кроком 0,016; Mn з кроком 0,033; Si з кроком 0,033).

Сталь марки F можна сказати майже не входить у вказаний інтервал  $1,2 \leq Z^Y \leq 1,21$ . Нижче червоної лінії на рис. 6 дані задовольняють вказану вимогу. Результати досліджень дозволили встановити, що інтенсивність впливу вуглецю, кремнію та марганцю різна. За вмісту цих елементів на рівні 0,5 - 0,6 у приведених координатах відбувається (рис.2, б) зміна: до цього значення найбільш ефективним елементом, який впливає на значення  $Z^Y$  є марганець, після цього значення, провідну роль вже відіграють концентрації кремнію та разом з ним вуглецю, а інтенсивність впливу марганцю стає меншою.

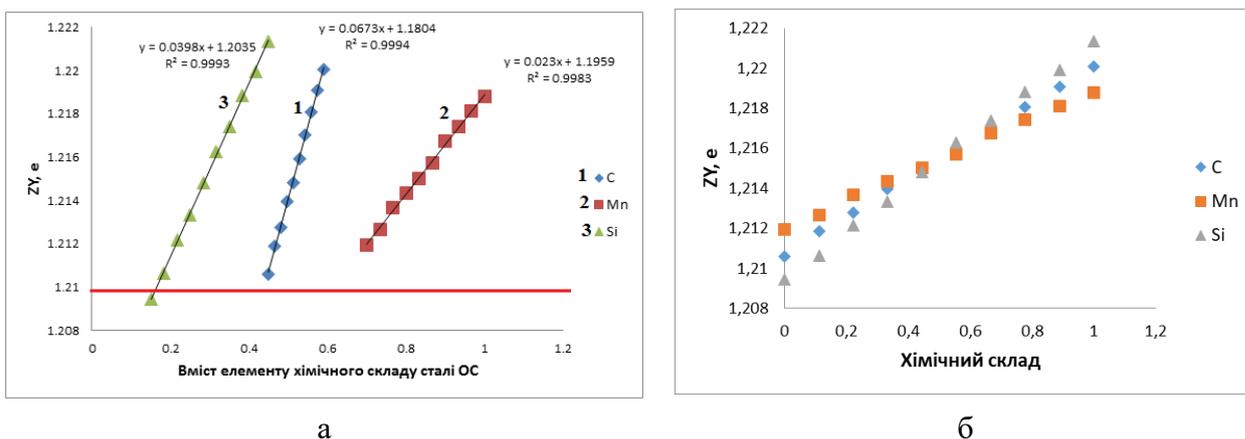


Рисунок 6 – Взаємозв'язок зарядового стану системи -  $Z^Y$  з елементами хімічного складу сталі марки F (а); вплив матричних елементів (C; Mn; Si) на зміну параметра міжатомної взаємодії -  $Z^Y$  (б)

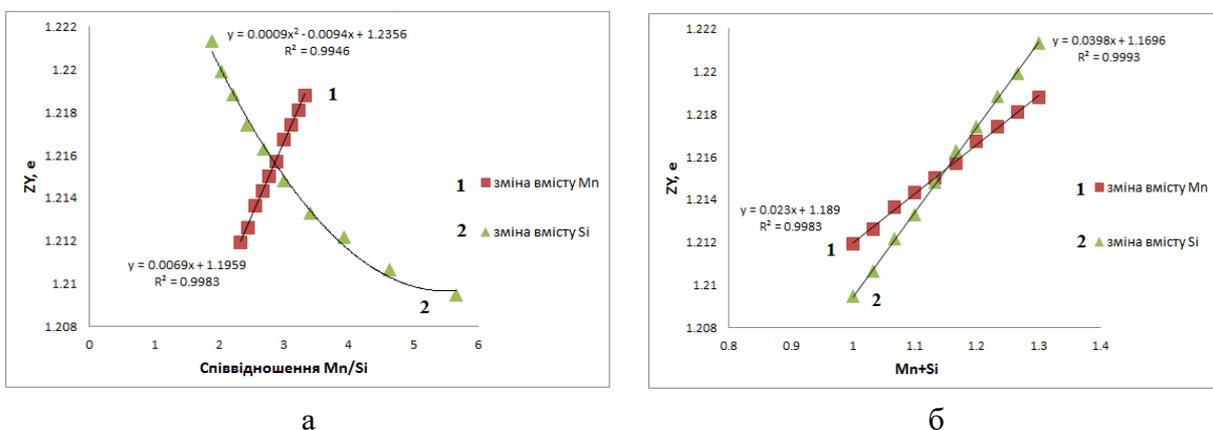


Рисунок 7 - Взаємозв'язок зарядового стану сталі F: а) з співвідношенням Mn/Si; б) з сумою (Mn+Si)

В результаті проведеного математичного експерименту встановлено, що за значень Mn/Si для сталі марки F на рівні 2,8-3,2 (так само, як і для попередньо аналізованих сталей EA1N та OC) відбувається зміна найбільш інтенсивного впливу співвідношення елементів на  $Z^Y$  сталі. До цього значення найбільший вплив та спадаючий характер функції носить збільшення параметру Mn/Si за рахунок зміни кремнію, а за подальшого збільшення Mn/Si вже стає більш ефективним збільшення вмісту марганцю, який має зростаючий характер. Таким чином, для підвищення параметру  $Z^Y$ , збільшення якого призводить до підвищення твердості необхідно віддавати перевагу збільшенню марганцю після значення Mn/Si на рівні 2,8-3,2, а до цього інтервалу – за рахунок збільшення вмісту кремнію.

В результаті дослідження впливу сумарного вмісту кремнію та марганцю на зарядовий стан сталі F встановлено, що в інтервалі значень 1,14-1,18 відбувається зміна провідного елемента, що впливає на цей параметр. До вказаного інтервалу найбільший вплив чинить зміна вмісту марганцю, після цього інтервалу – кремнію.

Таким чином, в результаті розрахункового експерименту можна зробити рекомендації щодо підходів до обрання раціонального хімічного складу в межах марки F: з точки зору забезпечення максимальної твердості, яка прямо пов'язана зі збільшенням параметру  $Z^Y$  необхідно обирати максимальне значення кремнію (рис. 7, 8) на рівні близько 0,45 % мас. та вміст вуглецю та марганцю не нижче середнього, при цьому наступна термічна обробка після гарячої деформації також сприятиме підвищенню твердості. Для сталі, склад якої відповідає  $Z^Y$  менше 1,21 з мінімальним вмістом кремнію та вмістом вуглецю і марганцю нижче середнього, нормалізація після гарячої пластичної деформації не призведе до суттєвого підвищення твердості, тому з позицій забезпечення достатньої твердості за мінімальної кількості обробок такий підхід також може бути використаний на практиці.

**Висновки.** Розроблені загальні рекомендації щодо вибору раціонального хімічного складу. Для забезпечення максимальної твердості може бути використаний раціональний підхід: вміст кремнію має бути наближеним до максимального рівня в межах марочного, вміст вуглецю і марганцю – не нижче середнього. Для сталей марок EA1N, частково марки OC та F наступна термічна обробка після гарячої пластичної деформації забезпечує підвищення твердості. Для сталі марки OC та F за певного хімічного складу наступна нормалізація не призведе до суттєвого підвищення твердості, тобто може бути забезпечений достатній рівень твердості без проведення вказаного етапу виробництва.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Clarke A.J., Miller M., Field R., Coughlin D., Gibbs P., Clarke K.D., Alexander D., Powers K., Papin A.P., Krauss G. Atomic and nanoscale chemical and structural changes in quenched and tempered 4340 steel. *Acta Materialia*. 2014. Vol. 77. P.17–27. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.032>
2. López Ríos M., Socorro Perdomo P.P., Voiculescu I., Geanta V., Crăciun V., Boerasu I., & Mirza Rosca J.C. Effects of nickel content on the microstructure, microhardness and corrosion behavior of high-entropy AlCoCrFeNi<sub>x</sub> alloys. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 21119.

3. Posonskyi S.F. The effect of manganese and carbon on the mechanical properties of the welded layer of the bucket teeth of the Hadfield steel excavator. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29. P. 65-71.
4. Коковихин Ю.И. Технология сталепроволочного производства :учебн. для студентов вузов. Киев : Ин-т систем. исслед. образования, 1995. 608 с.
5. Узлов И.Г., Гасик М.И., Есаулов А.Т., Мирошниченко Н.Г., Пройдак Ю.С. Колесная сталь. К.:Техніка, 1985. 168 с.
6. Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. 2024. Vol. 64. P. 58-71. DOI: 10.3952/physics.2024.64.1.6
7. Поворотня І. Р., Сафронова О. А., Подольський Р. В., Олійник Е. В. Вплив хімічного складу на фазову структуру і твердість вуглецевої сталі для залізничних осей після деформації та термічної обробки. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 656-671. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-656-671>.

#### REFERENCES

1. Clarke, A.J., Miller, M., Field, R., Coughlin, D., Gibbs, P., Clarke K.D., Alexander D., Powers K., Papin A.P., & Krauss G. (2014). Atomic and nanoscale chemical and structural changes in quenched and tempered 4340 steel. *Acta Materialia*, 77, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.032>
2. López Ríos, M., Socorro Perdomo, P.P., Voiculescu, I., Geanta, V., Crăciun, V., Boerasu, I., & Mirza Rosca, J.C. (2020). Effects of nickel content on the microstructure, microhardness and corrosion behavior of high-entropy AlCoCrFeNi<sub>x</sub> alloys. *Scientific Reports*, 10, 21119. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78108-5>
3. Posonskyi, S.F. (2024). The effect of manganese and carbon on the mechanical properties of the welded layer of the bucket teeth of the Hadfield steel excavator. *Problems of Tribology*, 29, 65-71. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-113-3-65-71>
4. Kokovihin, Yu.I. (1995). Tehnologiya staleprovolochnogo proizvodstva :uchebn. dlya studentov vuzov [Tehnologiya staleprovolochnogo proizvodstva :uchebn. dlya studentov vuzov]. Tehnologiya staleprovolochnogo proizvodstva :uchebn. dlya studentov vuzov [in Russian].
5. Uzlov, I.G., Gasik, M.I., Esaulov, A.T., Miroshnichenko, N.G., & Proydak, Yu.S. (1985). Kolesnaya stal [Wheel steel]. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
6. Togobitska, D., & Belkova, A. (2024). New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*, 64, 58-71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
7. Povorotnia, I.R., Safronova, O.A., Podolskyi, R.V., & Oliinyk, E.V. (2024). Vplyv khimichnoho skladu na fazovu strukturu i tverdist vuhletsevoi stali dlia zaliznychnykh osei pislia deformatsii ta termichnoi obrobky [Injection of a chemical warehouse onto the phase structure and hardness of carbon steel for sliding axes after deformation and thermal processing]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii*, 38, 656-671. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-656-671>.

Received 26.05.2025.

Accepted 30.05.2025.

#### ***Optimal Mn/Si parameters for adjusting the mechanical properties of steel for railway axles***

*The work presented a comprehensive approach to finding the optimal steel composition within known grades based on the concept of directional chemical bonding. This approach*

*made it possible to take into account the overall chemical composition and to analyze the nature of interactions between elements at the level of interatomic bonds, which is critical for predicting the properties of the final material. The concept of directed chemical bonding was based on the idea of the ability of individual elements to undergo electronic redistribution in the melt, which in turn affects the structure and stability of the system. The aim of the study was to determine the effect of variations in the content of the main matrix elements — carbon, silicon, and manganese - on the charge state of the system, represented by the generalized parameter  $Z^Y$ . This parameter reflects the degree of chemical balance in the alloy and serves as an indicator of the stability of the melt's electronic structure. As a result, the sensitivity of the system to the Mn/Si ratio was investigated as an indicator defining electronic and structural equilibrium. Thus, to enhance the  $Z^Y$  parameter, whose increase leads to improved hardness, it is necessary to prioritize manganese content after the Mn/Si ratio reaches 2.8–3.2, while below this interval — through an increase in silicon content. The manganese-to-silicon ratio (Mn/Si) should be within the range of 2.8–3.2. An increase in Mn/Si beyond 3.2 causes manganese to dominate, which may disrupt the balance. Therefore, controlling the content of alloying elements, especially silicon and manganese, is a key condition for producing steels with predictable properties. The results of the modeling emphasize the feasibility of using computational approaches in materials science. Predictive modeling allows for the effective adaptation of steel structure to the specified performance characteristics already at the stage of chemical composition design. This contributes to reducing experimental development costs and shortening the time to bring new alloys into production.*

*Keywords: railway axle, predictive modeling, silicon, manganese, mechanical properties, chemical composition.*

**Поворотня Ірина Романівна** – канд. техн. наук, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна.

**Сафронова Олена Анатоліївна** – аспірантка, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна.

**Подольський Ростислав Вячеславович** – докт. філ., в.о зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна.

**Кононенко Ганна Андріївна** - докт. техн. наук, ст. досл., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, професор НТУ «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

**Povorotnia Irina** – Cand.Tech.Sci., researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

**Safronova Olena** – PhD-student, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

**Podolskyi Rostyslav** – PhD, Acting Head of the Department of Problems of Deformation and Heat Treatment of Structural Steels of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

**Kononenko Ganna** - Doct. technical science, sen.resear., Senior Researcher at the Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine, Professor at the National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine.

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СТРИБКА УЩІЛЬНЕННЯ  
З НАДЗВУКОВИМ ЛАМІНАРНИМ ПРИМЕЖОВИМ ШАРОМ  
ЗА НАЯВНІСТЮ ТЕПЛОМАСООБМІНУ З ПОВЕРХНЕЮ**

*Анотація.* Наведено результати параметричних чисельних експериментів по впливу тепло- та масообміну на відрив потоку при взаємодії косоного стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром. Реалізовано неявний скінченно-об'ємний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса, заснований на схемі Roe, із застосуванням обмежувача потоку Jameson. Чисельне моделювання проводилося з метою дослідження можливостей керування відривом потоку за допомогою тепло- та масообміну з поверхнею, що обтікається. На основі аналізу просторових розподілів тиску, профілів густини, динамічного коефіцієнта в'язкості, поздовжніх компонент швидкості і кількості руху в примежових ламінарних шарах виявлено основні чинники, що визначають зміни структури відривної взаємодії в умовах тепло- та масообміну. Показано, що незважаючи на різну фізичну природу впливу, тепло-і масообмін з поверхнею надає подібну результуючу дію на розміри та структуру надзвукової відривної зони. Виявлено, що за допомогою тепло- та масообміну є можливим запобігання виникненню відривної зони у двовимірних надзвукових течіях.

*Ключові слова.* Чисельне моделювання, стрибок ущільнення, ламінарний примежовий шар, тепломасообмін.

**Постановка проблеми.** Проблема керування відривом надзвукових відривних течій є дуже актуальною при організації теплового захисту елементів конструкцій від високотемпературних потоків та оптимізації аеродинамічної форми літальних апаратів. Зміна температури обтічної поверхні може бути одним із засобів керування відривом потоку. Видалення загальмованих частинок примежового шару крізь пористу ділянку поверхні також відноситься до засобів впливу на структуру відривної течії [1-3]. Порівняння результуючої дії цих двох різних с фізичної точки зору факторів впливу в рамках однієї і теж надзвукової течії є актуальною науково-дослідною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У 1960-1980-х роках проведено низку досліджень про вплив умов тепло- та масообміну на відрив надзвукового примежового шару для двовимірних плоских та осесиметричних течій [1, 4-6]. Основним науковим інструментом був фізичний експеримент продування в аеродинамічних трубах. Виявлено деякі емпіричні закономірності для структури течії, впливу вгору за потоком, положення точки відриву для ламінарних та турбулентних в'язко-нев'язких взаємодій.

За останні два десятиліття ситуація в наукових дослідженнях щодо цього напрямку практично не змінилася. Управління надзвуковим відривом потоку за допомогою тепло- та масообміну розглядається тільки для плоских та осесиметричних течій при надзвукових та гіперзвукових швидкостях. Проведено чисельне моделювання для падаючого косоного стрибка ущільнення [7], кута стиснення, створеного осесиметричними конусами [8], надзвукової частини сопла Лавалю при перерозширеному режимі течії [9]. Окрема увага приділялася впливу температури обтічної поверхні як на взаємодію ударних хвиль з турбулентним примежовим шаром, так і на примежовий шар, що вільно розвивається, за рахунок нестационарних ефектів, властивих моделюванню великими вихорами [7, 10].

Порівняльний аналіз впливу тепло- та масообміну на структуру надзвукових відривних течій не проводився.

**Постановка задачі дослідження.** Чисельне моделювання впливу тепло- і масообміну на відрив надзвукового ламінарного примежового шару проводилося для умов базових експериментів Наккінен [11]. Схему течії наведено на рис. 1.

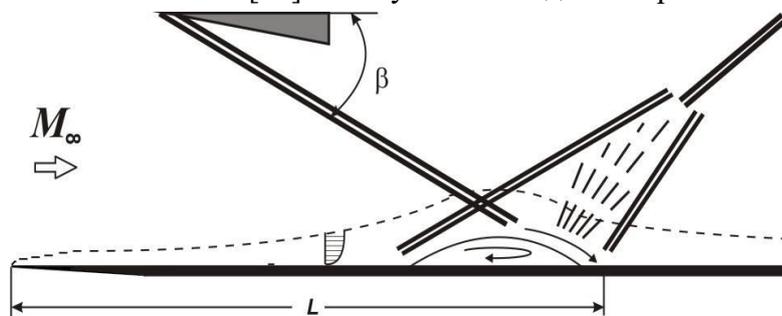


Рисунок 1 – Схема взаємодії косоного стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром на плоскій пластині

Відстань  $L$  від носика пластини до точки падіння косоного стрибка по нев'язкій течії становила  $0.0495$  м (1.95 дюйма). Число Рейнольдса, визначене на даній відстані, дорівнювало  $Re_L = 2.96 \cdot 10^5$ . Розглядалося значення кута падаючого стрибка  $\beta = 32.6^\circ$  при числі Маха  $M_\infty = 2$  незбуреного потоку.

Умови теплообміну визначались відношенням  $T_w / T_r$  у діапазоні від 0.4 до 1.6. Тут  $T_w$  – температура поверхні,  $T_r = T_\infty \left( 1 + r \frac{(\gamma - 1)}{2} M_\infty^2 \right)$  – температура відновлення з коефіцієнтом відновлення  $r = 0.851$  для ламінарних течій при  $\gamma = 1.4$ .

При моделюванні масообміну пориста ділянка знаходилася в інтервалі  $0.12 \leq x / L \leq 1.38$ . Інтенсивність масообміну через пористу ділянку пластики визначалася безрозмірним параметром  $\lambda = (\rho v)_{\text{вд}} / (\rho U)_\infty$ , де  $\rho$  – густина повітря;  $v$ ,  $U_\infty$  – значення швидкості при масообміні та в незбуреному потоці. Параметр  $\lambda$  змінювався у діапазоні  $-0.004 \leq \lambda \leq 0$ .

**Чисельний алгоритм та його верифікація.** Для математичного моделювання використовувався неявний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса стисливого газу,

записаних у довільних координатах [12]. Дискретний аналог вихідної системи рівнянь будувався на основі метода скінченних об'ємів [13]. Конвективні доданки розраховувались за допомогою схеми Roe [14, 15]. Другий порядок точності за простором забезпечувався використанням симетричного обмежувача потоків Jameson [16].

Чисельний алгоритм [12] було верифіковано на задачах трансзвукового обтікання аеродинамічних профілів. Для випадку надзвукової течії проведено додаткове тестування алгоритму [12] у порівнянні з експериментальними даними [11] (рис. 2-4). Розрахункова сітка містила 400x500 вузлів із рівномірним кроком за віссю OX. У поперечному напрямку вузли сітки згущувалися поблизу твердої стінки, щоб у примежовому шарі перед областю взаємодії знаходилося 100÷150 вузлів, а в області відриву – 200÷250 вузлів.

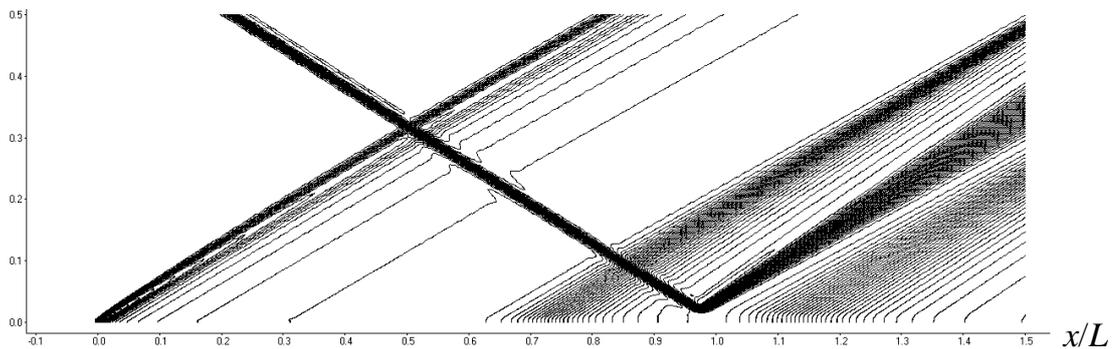
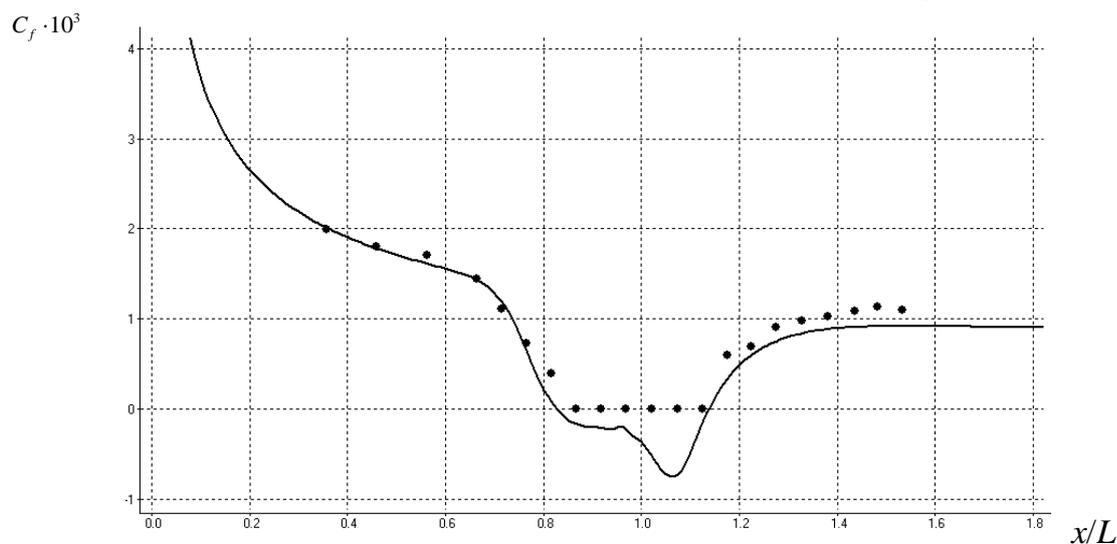


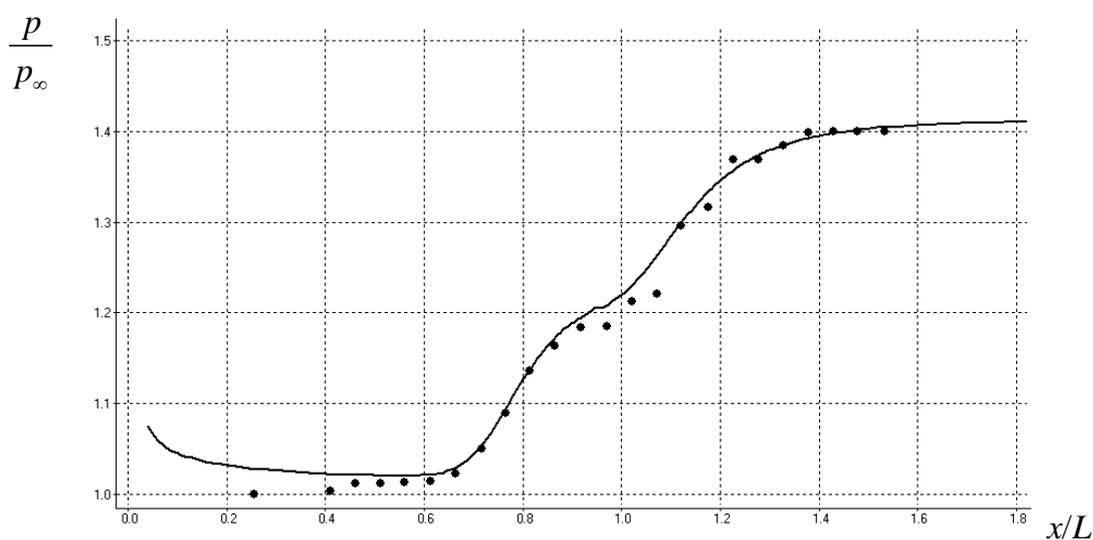
Рисунок 2 – Розподіл ізобар в області взаємодії

Падаючий від генератора стрибок ущільнення створює в надзвуковій нев'язкій течії градієнт тиску. У пристінковій ділянці дозвукової течії це підвищення тиску поширюється вгору за течією, викликаючи потовщення примежового шару та відрив потоку. Загальний перепад тиску за відбитим стрибком ущільнення становив  $p_2/p_\infty=1.41$ . Області відриву відповідає від'ємне значення коефіцієнта тертя, у точках відриву та приєднання коефіцієнт тертя дорівнює нулю (рис. 3а). Слід зазначити, що в експерименті [11] від'ємні значення коефіцієнта тертя та поздовжньої компоненти швидкості не вимірювалися, а замінювалися на нульові значення.

Відрив потоку, в свою чергу, призводить до утворення хвиль стискування, які у нев'язкій течії утворюють стрибок відриву. При обтіканні відривної зони формуються хвилі розрідження типу Прандтля-Майєра, що проявляється у характерному «плато» у розподілі тиску на пластині (рис. 3б). Приєднання потоку веде до утворення ще одного віяла хвиль стискування.



а) розподіл коефіцієнту тертя



б) розподіл тиску

Рисунок 3 – Розподіли газодинамічних параметрів вздовж пластини

● – експериментальні дані [11]; — – розрахунок

Зміни профілів поздовжньої компоненти швидкості наочно передають еволюцію примежового шару пластини (рис. 4). Перетин  $x/L=0.564$  знаходиться досить далеко від області взаємодії. Тут профіль швидкості відповідає незбуреному ламінарному примежовому шару. Точка  $x/L=0.768$  розташована на невеликій відстані перед відривною зоною ( $x_{sep}/L=0.825$ ). Хоча коефіцієнт тертя залишається додатнім, але у профілі швидкості у твердій стінки проявляється характерний прогин, викликаний передачею збурень вгору за потоком.

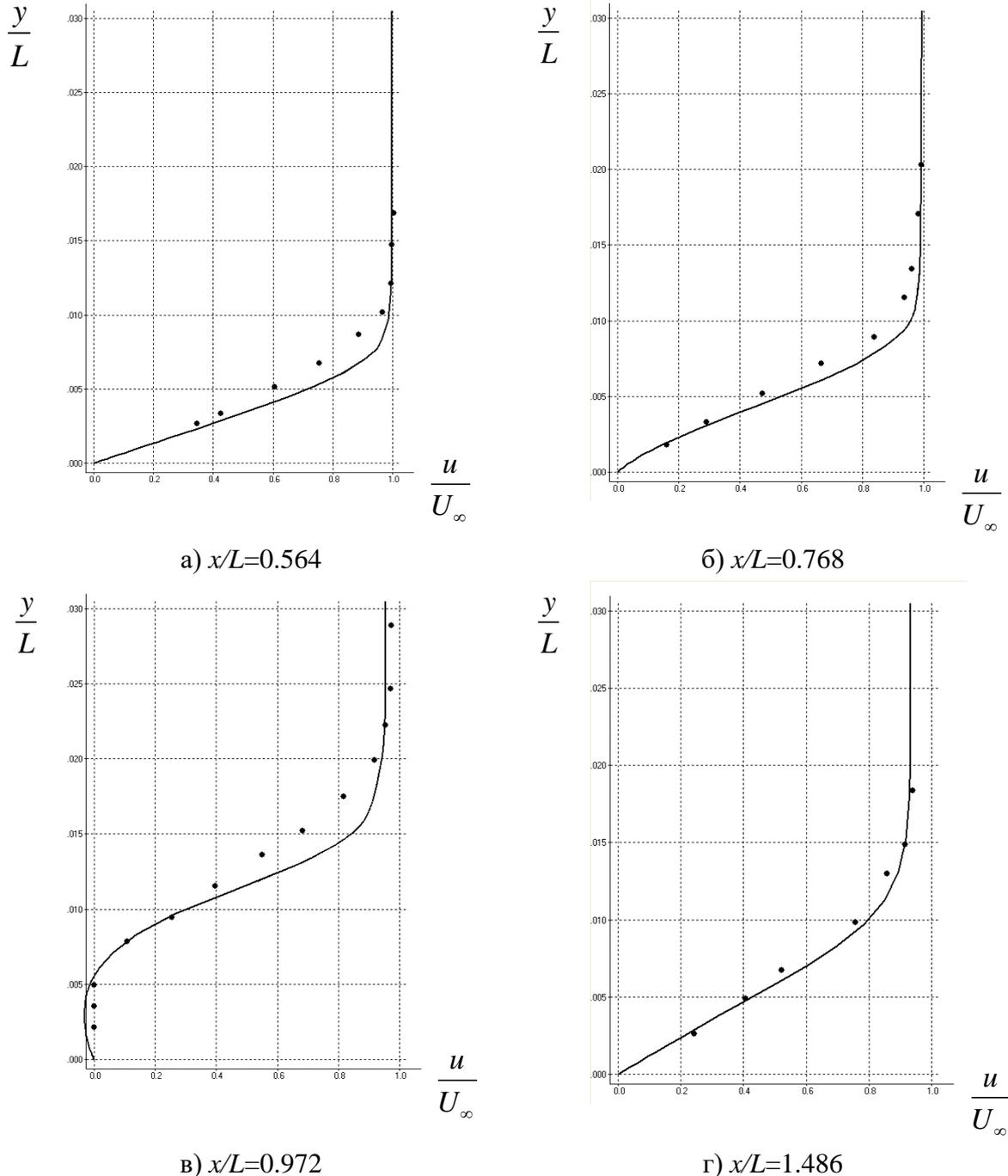
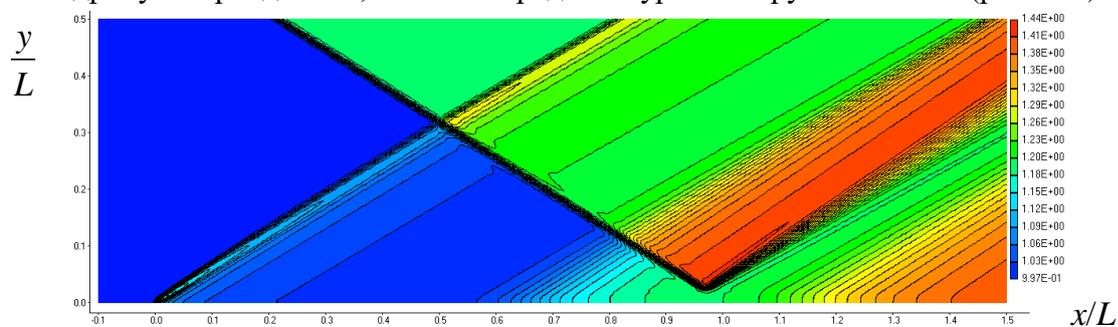


Рисунок 4 – Розподіли газодинамічних параметрів вздовж пластини

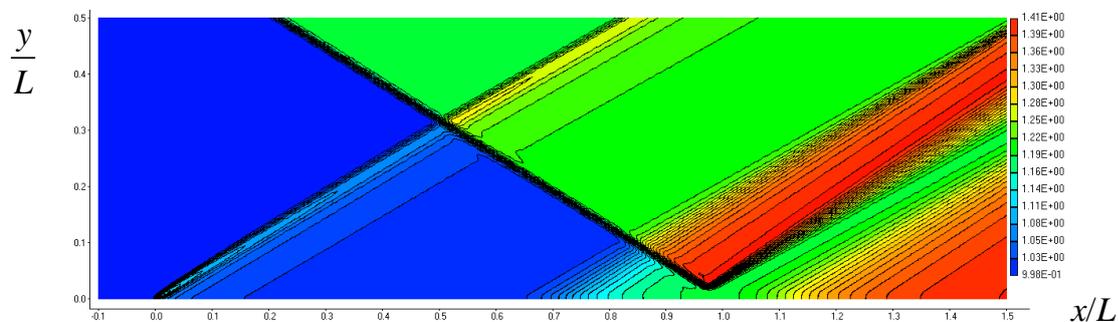
● – експериментальні дані [11]; — – розрахунок

Профіль швидкості при  $x/L=0.972$  передає структуру течії всередині відривної зони. Зворотна течія є дозвуковою з невеликими від'ємними значеннями компоненти  $u$ . Слід зазначити, що значення висоти зони відриву, отримані у розрахунках та експерименті [11], узгоджуються між собою. Над відривною зоною потік прискорюється до надзвукового, потім відбувається вирівнювання профілю нев'язкої частини течії. Перетин  $x/L=1.486$ , розташований в області приєднаної течії, де профіль швидкості відновлюється до форми, що відповідає ламінарному прикордонному шару.

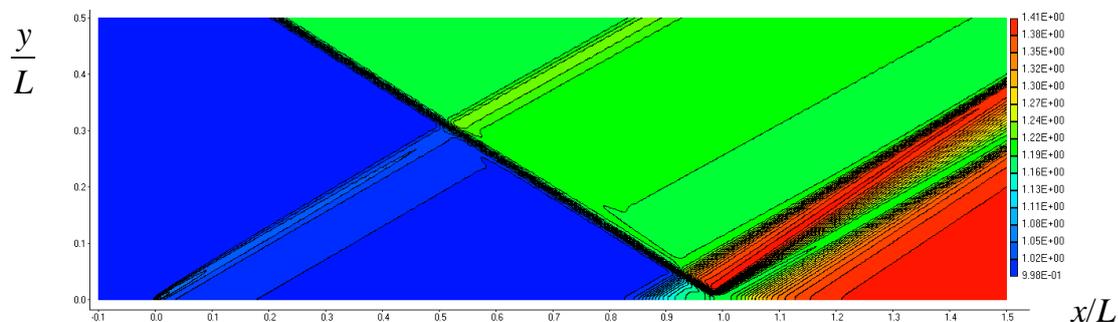
**Основні результати чисельного моделювання.** Перша серія чисельних експериментів була присвячена впливу теплообміну з непроникною поверхнею пластини. Загальна структура взаємодії, положення точок відриву та приєднання, зона впливу вгору за потоком істотно залежать від теплообміну з поверхнею, що обтікається. Зменшення температури пластини призводить до зменшення області взаємодії, зближення точок відриву та приєднання, меншої передачі збурень вгору за потоком (рис. 5-7).



а)  $T_w/T_r=1.3$  – підігрів поверхні

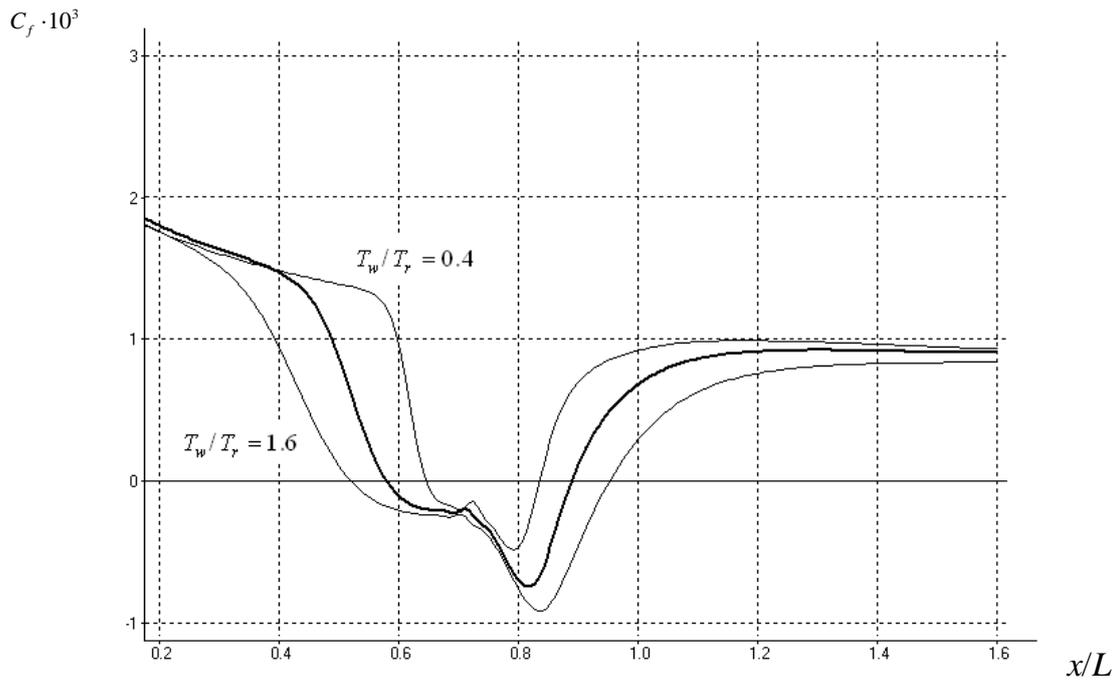


б)  $T_w/T_r=1.0$  – наближена теплоізоляція

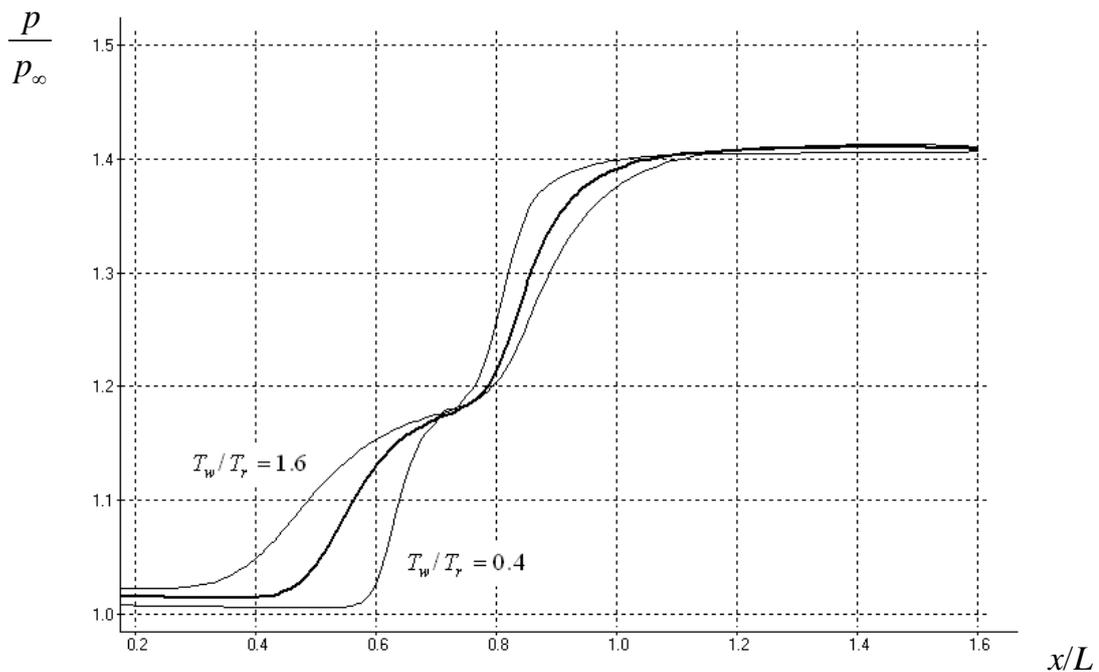


в)  $T_w/T_r=0.4$  – охолодження поверхні

Рисунок 5 – Вплив температури поверхні на структуру взаємодії косої стрижки ущільнення з ламінарним примежовим шаром



а) розподіли коефіцієнту тертя



б) розподіли тиску

Рисунок 6 – Вплив температури поверхні на розподіли газодинамічних параметрів вздовж пластини

Фізичні особливості впливу температури поверхні на взаємодію стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром можуть бути виявлені при аналізі профілів густини, динамічного коефіцієнта в'язкості, повздовжніх компонент швидкості та кількості руху (рис. 7).

Одним з факторів, що впливають на характеристики примежового шару, що

набігає, є розподіл густини. Зі зниженням температури пластини густина газу, що набігає, в примежовому шарі зростає (рис. 7а). Для умов цього розрахунку підвищення густини на поверхні пластини становило від  $\rho_w/\rho_\infty = 0.382$  при  $T_w/T_r = 1.6$  до  $\rho_w/\rho_\infty = 1.497$  при  $T_w/T_r = 0.4$ .

Іншим фактором є значення динамічного коефіцієнта молекулярної в'язкості, яке залежить від температури потоку  $\mu/\mu_\infty = (T/T_\infty)^{0.76}$ . Зі збільшенням температури пластини в'язкість газу збільшується, що веде до додаткового гальмування в примежовому шарі (рис. 7б, 7в).

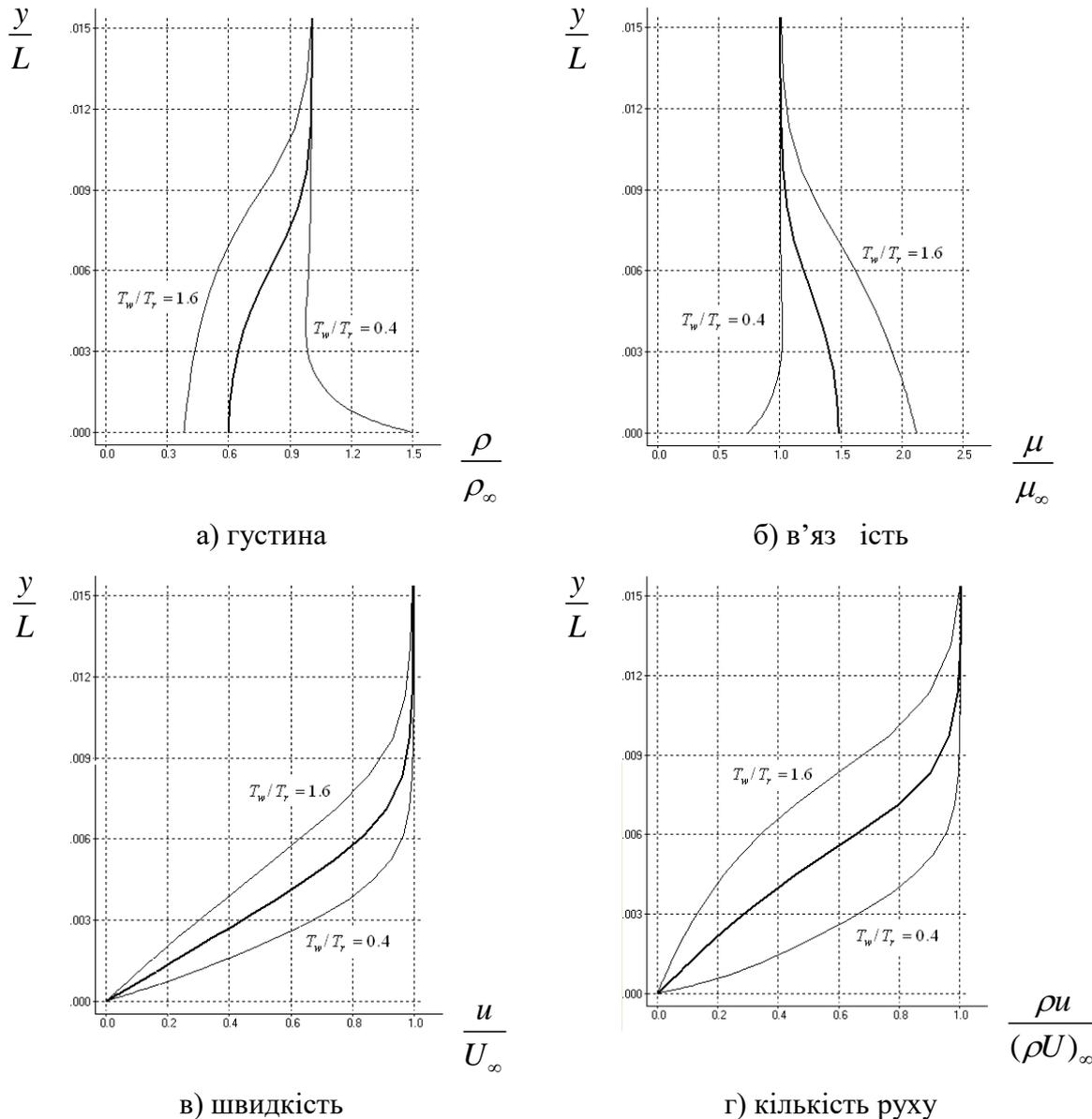


Рисунок 7 – Вплив температури поверхні на профілі газодинамічних параметрів при  $x/L=0.564$

При підігріванні пластини поперечний градієнт швидкості  $\partial u/\partial n$  зменшується; а при охолодженні – збільшується; профіль швидкості стає більш "наповненим". Слід за-

значити, що ці зміни фактично не стосуються значення коефіцієнта тертя в ламінарному примежовому шарі, що набігає (рис. 6а). Зі зменшенням значення поперечного градієнта швидкості одночасно зростає значення динамічного коефіцієнта молекулярної в'язкості  $\mu_w$  на стінці, так що коефіцієнт тертя  $c_f$  у безградієнтному ламінарному примежовому шарі практично не залежить від температури пластини. Таким чином, на зміну поздовжньої компоненти кількості руху одночасно впливають обидва фактори. При охолодженні пластини збільшується як густина газу, так і його швидкість.

Підігрів пластини має зворотну тенденцію охолодженню. Внаслідок підвищення імпульсу в поздовжньому напрямку "охолоджений" газ стає більш інерційним, легше долає несприятливий градієнт тиску. Зона взаємодії звужується, точки відриву та приєднання зміщуються до точки падіння стрибка ущільнення за нев'язкою течією.

У другій серії чисельних експериментів було розглянуто вплив масообміну крізь пористу ділянку пластини. Вдув газу ( $\lambda > 0$ ) через пористу ділянку не розглядався. Як показали результати розрахунків, вже при значенні  $\lambda = +0.0005$  відривна зона займала всю довжину пористої ділянки. Відрив потоку розпадався на кілька вихрових зон із нестационарним характером взаємодії.

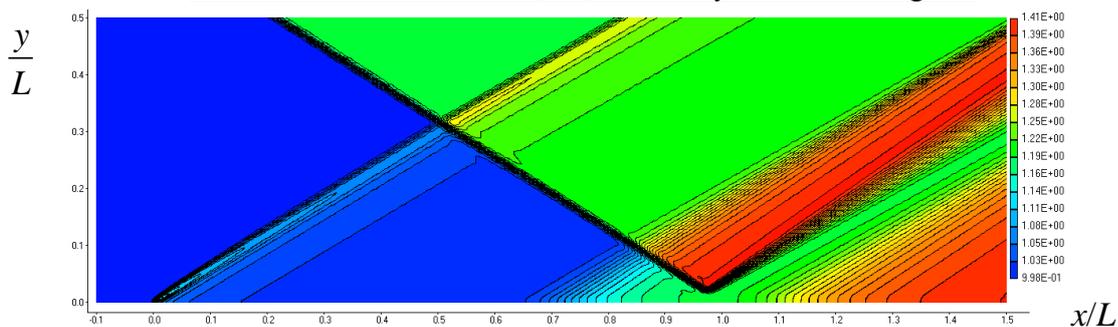
Результати розрахунків взаємодії косоного стрибка ущільнення з примежовим ламінарним шаром для значень параметра масообміну  $\lambda \leq 0$  представлені на рис. 8-10.

Видалення загальмованих частинок примежового шару істотно впливає на структуру течії, що розглядається. Стрибки відриву та приєднання зближуються між собою, утворюючи при  $\lambda = -0.003$  фактично регулярне відображення падаючого стрибка. При значенні  $\lambda = -0.002$  течія стає безвідривною, а «плато» тиску повністю зникає (рис. 9).

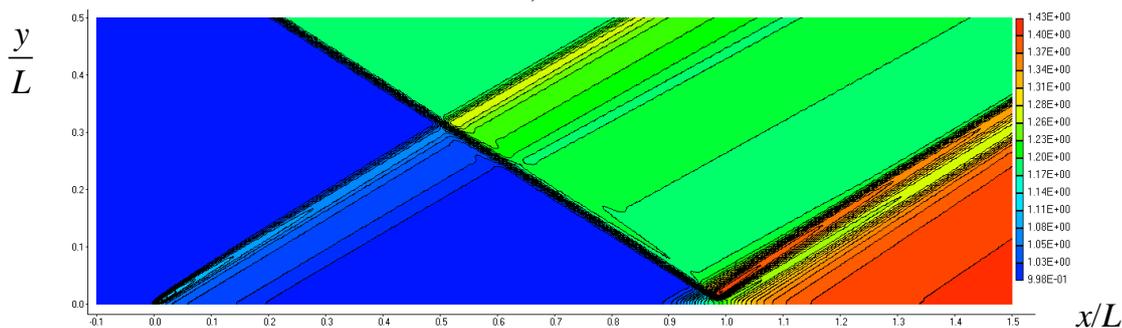
Профілі густини, динамічного коефіцієнта в'язкості, поздовжніх компонентів швидкості та кількості руху прояснюють фізичні особливості впливу масообміну з поверхні, що обтікається, на взаємодію стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром (рис. 10).

При зміні параметру масообміну густина та динамічний коефіцієнт в'язкості змінюються незначним чином. Деяке підвищення густини та зменшення в'язкості пов'язане із заміщенням видалених частинок більш щільними та холодними з верхньої частини примежового шару (рис. 10а, 10б).

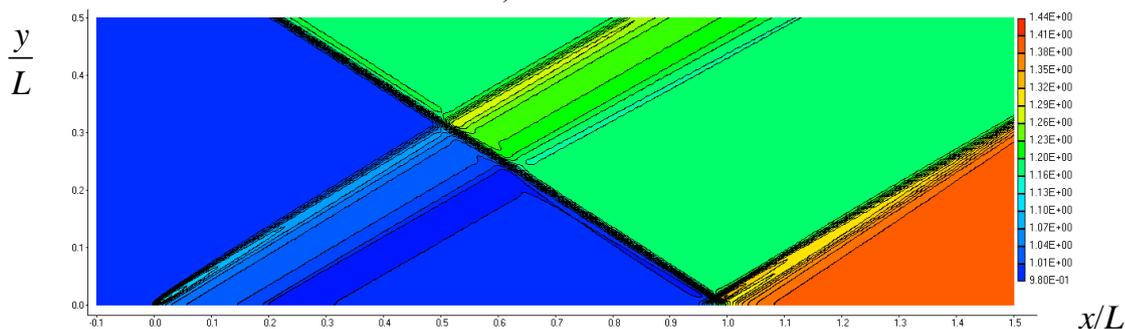
Основним фактором, що характеризує зміни в примежовому шарі є зміна профілю швидкості (рис. 10в).



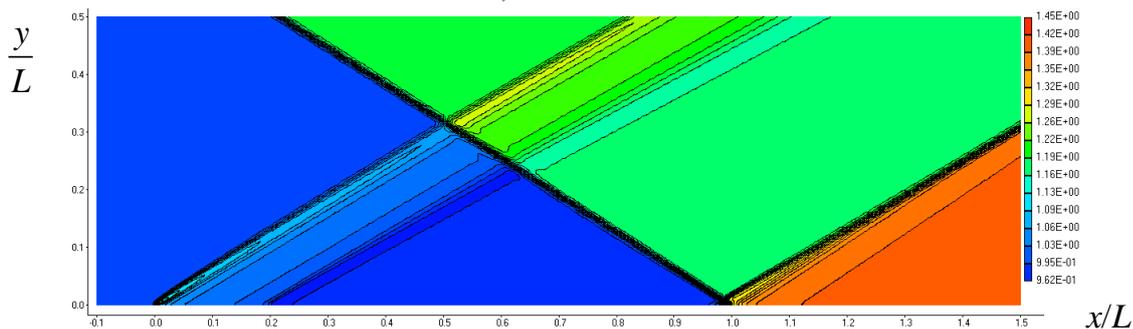
а)  $\lambda=0$ .



б)  $\lambda=-0.001$

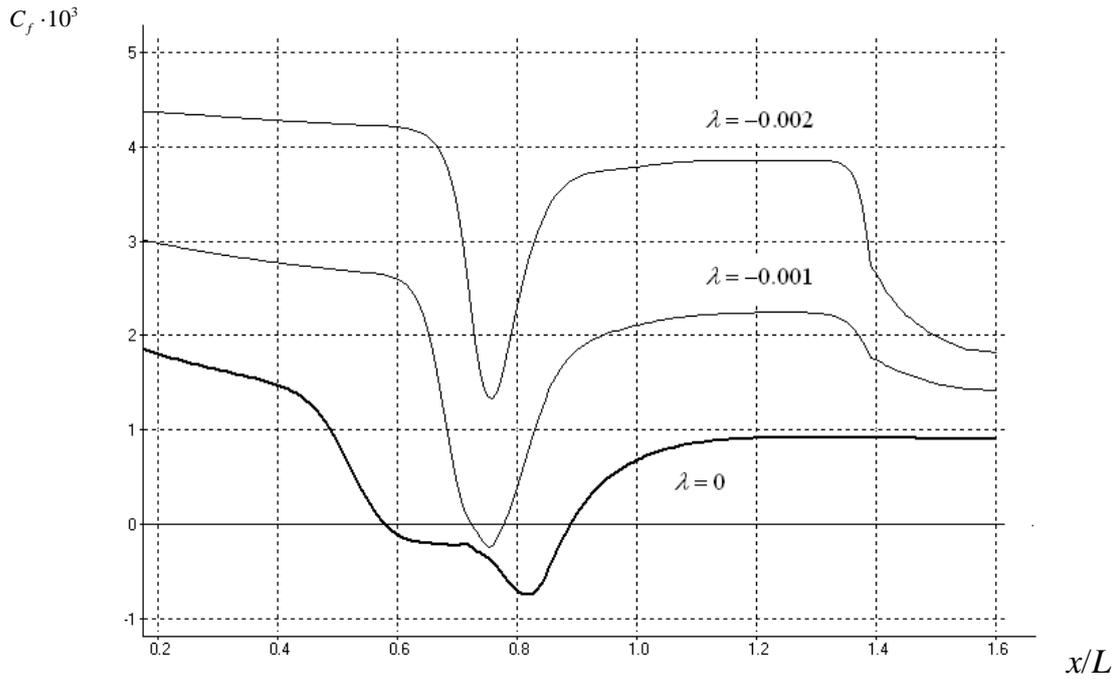


в)  $\lambda=-0.002$

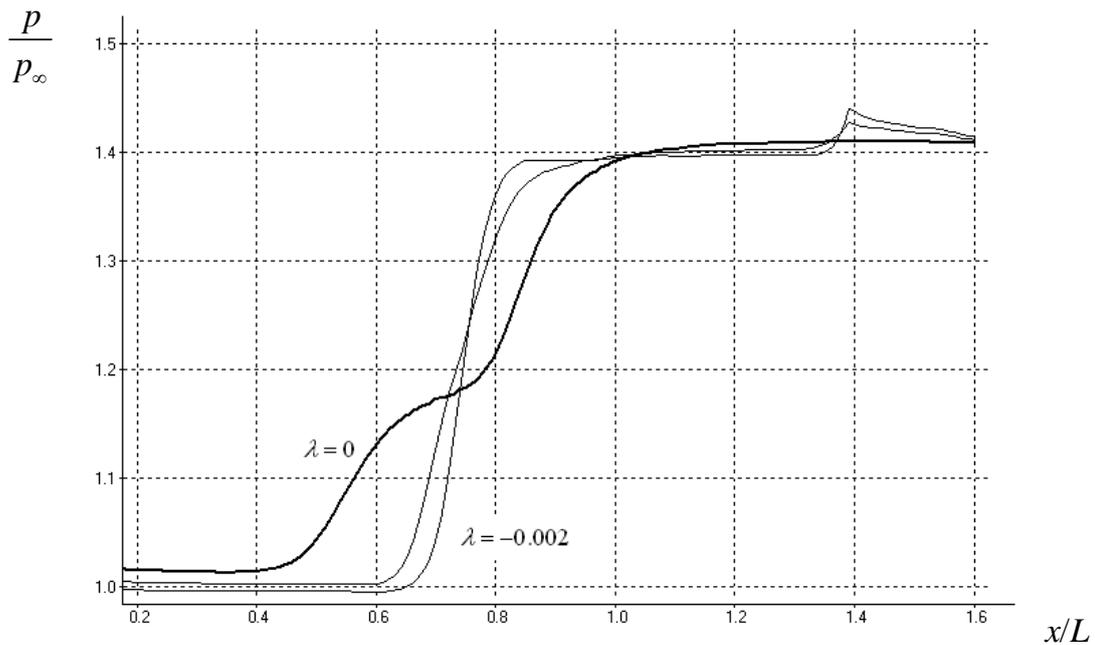


г)  $\lambda=-0.003$

Рисунок 8 – Вплив масообміну на структуру взаємодії  
косого стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром



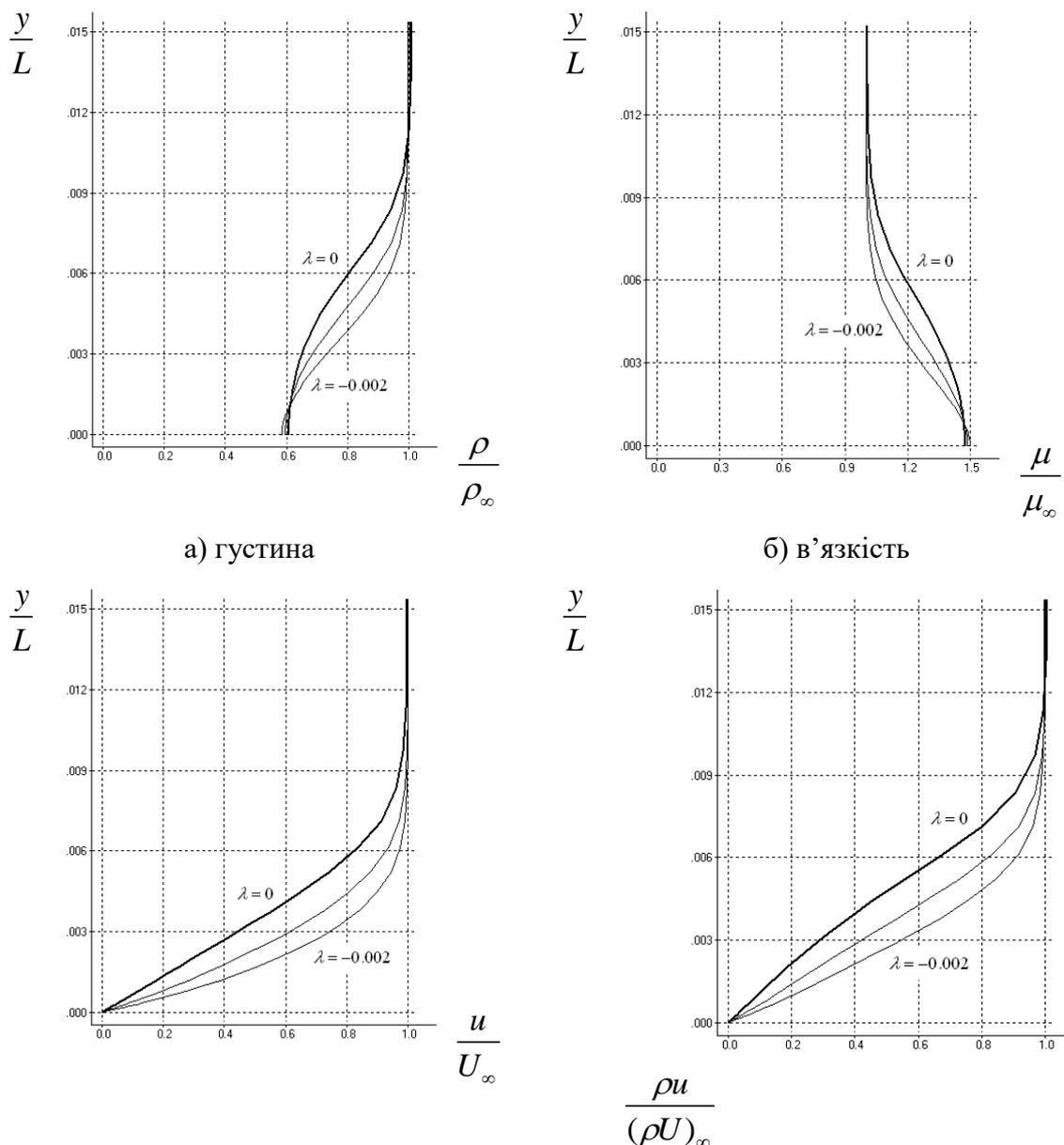
а) розподіли коефіцієнту тертя



б) розподіли тиску

Рисунок 9 – Вплив масообміну поверхні на розподіли газодинамічних параметрів вздовж пластини

Видалення загальмованих частинок з примежового шару призводить до більшого наповнення профілю швидкості. Ця обставина, у поєднанні з практично постійним значенням динамічного коефіцієнта в'язкості на поверхні, веде до значного зростання коефіцієнта тертя в примежовому шарі (рис. 9а). Результатом цих змін у структурі примежового шару є збільшення поздовжньої компоненти кількості руху (рис. 10г).



а) густина

б) в'язкість

в) швидкість

г) кількість руху

Рисунок 10 – Вплив масообміну на профілі газодинамічних параметрів при  $x/L=0.564$

**Висновки.** Проведено порівняльний аналіз на основі параметричних чисельних експериментів по впливу тепло- та масообміну на відрив потоку при взаємодії косоного стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром. На основі зміни профілів густини, динамічного коефіцієнта в'язкості, поздовжніх компонент швидкості і кількості руху в примежовому шарі виявлено основні фізичні чинники, які визначають вплив умов тепло- та масообміну на структуру надзвукової відривної взаємодії з поверхнею. Виявлено, що за допомогою тепло- та масообміну можливо запобігання виникненню відривної зони у двовимірних надзвукових течіях.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Chang P.K. Separation of Flow. // Pergamon Press, 1970 – 777 p.
2. Green J.E. Interactions between shock waves and turbulent boundary layers. // Progress in aerospace sciences. Vol. 11, 1970 – p. 235-340.
3. Adamson T.C., Messiter A.F. Analysis of two-dimensional interaction between shock waves and boundary layers. // Annual review of fluid mechanics. Vol. 12, 1980. – p. 103-138.
4. Lewis J.E., Kubota T., Lees L. Experimental investigation of supersonic laminar, two-dimensional boundary-layer separation in a compression corner with and without cooling. // AIAA Journal, V. 6, No 1, 1968 – p. 7-14.
5. Spaid F.W., Frisshett J.C. Incipient Separation of a Supersonic, Turbulent Boundary Layer, Including Effects of Heat Transfer. // AIAA Journal, V. 10, No 7, 1972 – p. 915-922.
6. Back L.H., Cuffel R.F. Shock wave/turbulent boundary-layer interactions with and without surface cooling. // AIAA Journal, V. 14, No 4, 1976 – p. 525-534.
7. Bernardini M., Asproulis I., Larsson J., Pirozzoli S., Grasso F. Heat transfer and wall temperature effects in shock wave turbulent boundary layer interactions // Physical Review Fluids December 2016 – 17 p.
8. Pasha A.A., Juhany K.A. Effect of wall temperature on separation bubble size in laminar hypersonic shock/boundary layer interaction flows. // Advances in Mechanical Engineering, Vol. 11, No.11, 2019 – P.1–10
9. Murugesan P, Srikrishnan, Mohammad A., Velamati R.K. Numerical Study of Wall Heat Transfer Effects on Flow Separation in a Supersonic Overexpanded Nozzle // Energies, Vol.16, 1762, 2023 – 16 p.
10. Yuan X., Tong F., Li W. Wall-attached temperature structures in supersonic turbulent boundary layers // Physics of Fluids, Vol. 34, 115116, 2022 – 14 p.
11. Hakkinen R.L., Greber I., Trilling L., Arbanel S.S. The interaction of an oblique wave with a laminar boundary layer. // NASA Memo 2-18-59 W. 1959. – 49 p.
12. Pylypenko A. O., Polevoy O. B., Prykhodko O. A. Numerical simulation of Mach number and angle of attack influence on regimes of transonic turbulent flows over airfoils. // TsAGI Science Journal, Vol.43, No.1, 2012. – P. 1–36.
13. Tannehill J.C., Anderson D.A., Pletcher R.H. Computational fluid mechanics and heat transfer (Second edition) // Taylor & Francis, New York, 1997. – 785 p.
14. Roe P.L. Approximate Riemann schemes. // J. Computational Phys. Vol. 43., 1981. – P. 357-372.
15. Roe P.L. Characteristic-based schemes for the Euler equations. // Annual review of fluid mechanics. Vol. 18., 1986. – P. 337-365.
16. Jameson A. Analysis and design of numerical schemes for gas dynamics 1: Artificial diffusion, upwind biasing, limiters and their effect on accuracy and multigrid convergence // International Journal of Computational Fluid Dynamics. Vol. 4., 1995 – P.171-218.

**REFERENCES**

1. Chang P.K. Separation of Flow. // Pergamon Press, 1970 – 777 p.
2. Green J.E. Interactions between shock waves and turbulent boundary layers. // Progress in aerospace sciences. Vol. 11, 1970 – p. 235-340.

3. Adamson T.C., Messiter A.F. Analysis of two-dimensional interaction between shock waves and boundary layers. // Annual review of fluid mechanics. Vol. 12, 1980. – p. 103-138.
4. Lewis J.E., Kubota T., Lees L. Experimental investigation of supersonic laminar, two-dimensional boundary-layer separation in a compression corner with and without cooling. // AIAA Journal, V. 6, No 1, 1968 – p. 7-14.
5. Spaid F.W., Frishett J.C. Incipient Separation of a Supersonic, Turbulent Boundary Layer, Including Effects of Heat Transfer. // AIAA Journal, V. 10, No 7, 1972 – p. 915-922.
6. Back L.H., Cuffel R.F. Shock wave/turbulent boundary-layer interactions with and without surface cooling. // AIAA Journal, V. 14, No 4, 1976 – p. 525-534.
7. Bernardini M., Asproulias I., Larsson J., Pirozzoli S., Grasso F. Heat transfer and wall temperature effects in shock wave turbulent boundary layer interactions // Physical Review Fluids December 2016 – 17 p.
8. Pasha A.A., Juhany K.A. Effect of wall temperature on separation bubble size in laminar hypersonic shock/boundary layer interaction flows. // Advances in Mechanical Engineering, Vol. 11, No.11, 2019 – P.1–10
9. Murugesan P, Srikrishnan, Mohammad A., Velamati R.K. Numerical Study of Wall Heat Transfer Effects on Flow Separation in a Supersonic Overexpanded Nozzle // Energies, Vol,16, 1762, 2023 – 16 p.
10. Yuan X., Tong F., Li W. Wall-attached temperature structures in supersonic turbulent boundary layers // Physics of Fluids, Vol. 34, 115116, 2022 – 14 p.
11. Hakkinen R.L., Greber I., Trilling L., Arbanel S.S. The interaction of an oblique wave with a laminar boundary layer. // NASA Memo 2-18-59 W. 1959. – 49 p.
12. Pylypenko A. O., Polevoy O. B., Prykhodko O. A. Numerical simulation of Mach number and angle of attack influence on regimes of transonic turbulent flows over airfoils. // TsAGI Science Journal, Vol.43, No.1, 2012. – P. 1–36.
13. Tannehill J.C., Anderson D.A., Pletcher R.H. Computational fluid mechanics and heat transfer (Second edition) // Taylor & Francis, New York, 1997. – 785 p.
14. Roe P.L. Approximate Riemann schemes. // J. Computational Phys. Vol. 43., 1981. – P. 357-372.
15. Roe P.L. Characteristic-based schemes for the Euler equations. // Annual review of fluid mechanics. Vol. 18., 1986. – P. 337-365.
16. Jameson A. Analysis and design of numerical schemes for gas dynamics 1: Artificial diffusion, upwind biasing, limiters and their effect on accuracy and multigrid convergence // International Journal of Computational Fluid Dynamics. Vol. 4., 1995 – P.171-218.

Received 26.05.2025.  
Accepted 30.05.2025.

***Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a supersonic laminar boundary layer in the presence of heat and mass exchange with the surface***

*The results of parametric numerical experiments on the influence of heat and mass transfer on flow separation during the interaction of an oblique shock wave with a laminar boundary layer are presented. An implicit finite-volume algorithm for solving the Navier-Stokes equations for arbitrary coordinates, based on the Roe scheme for convective terms, is*

*implemented. The second order of accuracy in space was provided by using the symmetric Jamecon flux limiter. The numerical algorithm was verified on the problems of transonic and supersonic laminar and turbulent flows when compared with experimental data.*

*The study was carried out with the aim of comparative analysis of the possibilities of the flow separation control using heat and mass transfer with a streamlined surface under the same conditions of the shock wave/boundary layer interaction.*

*Spatial pressure distributions, pressure and skin friction coefficient distributions along the plate, profiles of density, dynamic viscosity coefficient, longitudinal velocity components and momentum in the laminar boundary layer are presented. The main physical factors determining changes in the structure of the separation interaction under heat and mass transfer conditions were identified. The effect of heat transfer with the plate was manifested primarily in changes in the profiles of density and dynamic viscosity coefficient, which significantly depend on temperature. Removal of slowed particles from the boundary layer leads to a greater filling of the velocity profile by mass transfer with the practically constant value of the dynamic viscosity coefficient on the surface.*

*Based on the analysis of the results obtained, it was found that the main factor in preventing flow separation is the increase in the longitudinal component of the momentum during plate cooling by heat transfer and the removal of slowed particles by mass transfer. Therefore, despite the different physical nature of the impact, heat and mass transfer with the surface has a similar resulting effect on the size and structure of the supersonic separation zone.*

*Using heat and mass transfer it is possible to prevent the occurrence of a separation zone in two-dimensional supersonic flows.*

*Keywords: numerical simulation, shock wave, laminar boundary layer, heat and mass transfer.*

**Польовий Олег Борисович** – кандидат фіз.-мат. наук, ст. науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій НАН України.

**Редчиць Дмитро Олександрович** – доктор фіз.-мат. наук, с.н.с., директор Інституту транспортних систем і технологій НАН України.

**Polevoy Oleg** – Ph.D., Senior Scientific Researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Redchyts Dmytro** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientific Researcher, director of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

К. Суковенко

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ У СФЕРІ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

*Анотація.* У статті досліджується концепція створення сучасної інформаційної технології, яка забезпечує ефективну підтримку прийняття рішень у сфері відеоспостереження. З огляду на зростаючий обсяг відеоданих, що генеруються системами моніторингу, особливо в умовах урбанізованого середовища, виникає потреба у високопродуктивних рішеннях, здатних працювати в режимі реального часу. Основна увага приділяється аналізу технологічних підходів до обробки відеопотоків із застосуванням штучного інтелекту, методів машинного навчання, обчислень на периферії (*edge computing*) та хмарних рішень. У межах дослідження представлено архітектурну модель багаторівневої інформаційної системи, яка включає модулі збору даних, попередньої обробки, аналітики та прийняття рішень. Особливу увагу приділено алгоритмам виявлення подій та класифікації поведінкових шаблонів, що дозволяє знизити залежність від людського фактору при аналізі потоків спостереження.

*В роботі також розглянуто аспекти інтеграції таких систем з іншими інформаційно-аналітичними платформами, зокрема базами біометричних даних, геоінформаційними системами, системами контролю доступу. Обґрунтовано переваги використання edge-архітектур, які дозволяють зменшити затримки при обробці відео, підвищити автономність системи та зменшити навантаження на центральну інфраструктуру. Результати дослідження можуть бути використані для створення інтелектуальних систем безпеки нового покоління, зокрема в рамках концепції Smart City. Представлений підхід може бути адаптований до потреб органів місцевого самоврядування, правоохоронних структур, а також приватного сектору, що займається охороною об'єктів критичної інфраструктури. Отримані результати демонструють практичну цінність застосування новітніх IT-рішень у сфері безпеки та моніторингу.*

*Ключові слова:* відеоспостереження, інформаційна технологія, підтримка прийняття рішень, безпека, AI, машинне навчання, *edge computing*, аналітика даних, інтеграція систем, автоматичне виявлення.

**Постановка проблеми.** У сучасному суспільстві, що характеризується зростанням урбанізації, техногенного навантаження та загроз безпеці різного походження, системи відеоспостереження відіграють надзвичайно важливу роль у захисті громадського порядку, інфраструктури та приватної власності. Традиційні підходи до відеомоніторингу, що передбачають переважно фіксацію та зберігання відеозаписів, поступово

втрачають свою ефективність. З огляду на стрімке зростання кількості джерел відеоінформації, ручний перегляд і аналіз відеопотоків стає фізично неможливим і економічно затратним. Це зумовлює необхідність створення нових інформаційних технологій, які забезпечують автоматизовану обробку великих обсягів відеоданих і здатні оперативно реагувати на критичні події.

Ключова проблема полягає в тому, щоб трансформувати відеоспостереження із пасивного інструменту фіксації подій у активну інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень. Така система повинна не лише виявляти потенційно небезпечні ситуації в реальному часі, а й аналізувати їх контекст, надавати рекомендації операторам або навіть автоматично ініціювати відповідні дії. У цьому контексті особливого значення набуває застосування штучного інтелекту, машинного навчання, edge computing та інтеграції з іншими інформаційно-аналітичними системами. Таким чином, актуальність дослідження обумовлена потребою у створенні ефективної, гнучкої та масштабованої інформаційної технології, здатної забезпечити прийняття рішень на основі відеоаналітики в умовах динамічного та складного середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У світовій науковій спільноті активно досліджуються можливості застосування інтелектуальних технологій у сфері відеоспостереження, зокрема в контексті автоматичного розпізнавання подій та аномальної поведінки. У роботі Y. Zhang, F. Liu та M. Wang представлено модель виявлення аномалій у режимі реального часу, яка ґрунтується на глибоких згорткових нейронних мережах і спрямована на підвищення точності в урбанізованих середовищах. Gupta і Jain досліджують ефективність використання штучного інтелекту у системах відеоаналітики, приділяючи особливу увагу проблемам класифікації та масштабованості таких рішень. У статті T. Chen та L. Chen розглянуто концепцію обчислень на периферії (edge computing) як засобу підвищення швидкодії систем відеоспостереження при збереженні високого рівня безпеки. Дослідження A. Luna, M. Tortonesi та M. Paganelli акцентує увагу на інтеграції відеоаналітики з хмарними сервісами та інтернетом речей, що відкриває нові можливості для адаптивного управління інформаційними потоками. Усі згадані роботи засвідчують високий науковий інтерес до тематики, проте більшість з них зосереджена на вузьких аспектах - таких як алгоритми розпізнавання або окремі архітектурні рішення - тоді як комплексна концепція технології підтримки рішень у сфері відеоспостереження потребує подальшої систематизації та міждисциплінарного підходу.

**Мета дослідженн.** Метою цього дослідження є розробка та теоретичне обґрунтування концепції інформаційної технології, здатної забезпечити ефективну підтримку прийняття рішень у сфері відеоспостереження на основі сучасних досягнень у галузях штучного інтелекту, машинного навчання, обчислень на периферії (edge computing) та інтеграційних цифрових платформ. Зокрема, дослідження спрямоване на визначення структури і функціональної архітектури такої системи, її основних модулів, методів збору, обробки, аналізу та візуалізації відеоданих, а також способів інтеграції з іншими інформаційними системами безпеки. Особливу увагу приділено завданням розробки алгоритмів виявлення аномальних подій у реальному часі, мінімізації затримок у пере-

дачі й обробці інформації, а також забезпеченню високої надійності, масштабованості та гнучкості у змінних середовищах функціонування системи. У межах роботи також передбачається оцінка можливостей практичного застосування запропонованої концепції в умовах «розумного міста» та інших безпекових сценаріїв.

**Викладення основного матеріалу.** Інформаційна технологія для підтримки прийняття рішень у сфері відеоспостереження передбачає створення комплексної багаторівневої системи, що поєднує в собі фізичні засоби збору інформації, інтелектуальні алгоритми її обробки та механізми прийняття рішень у режимі реального часу. Така система повинна бути гнучкою, масштабованою та сумісною з іншими цифровими платформами, що забезпечують безпеку, аналітику та управління міською або промисловою інфраструктурою. У центрі розробки стоїть ідея переходу від традиційного, реактивного відеоспостереження до проактивного, прогнозного та адаптивного моніторингу на основі аналітики даних.

Архітектура запропонованої системи будується за принципом ієрархічної багаторівневої моделі. На першому, сенсорному рівні, здійснюється первинний збір даних за допомогою відеокамер, тепловізійних сенсорів, детекторів руху, акустичних та інших спеціалізованих датчиків. Важливо, що всі пристрої повинні мати можливість безперервної роботи, автономного енергозабезпечення та бути захищеними від зовнішніх втручань. На цьому етапі формується первинний відеопотік, що надалі обробляється у проміжному обчислювальному контурі.

Другий рівень – обчислювальний – виконує попередню обробку даних. З метою зменшення обсягів інформації, що передається до центрального вузла, застосовується стискання, сегментація відео, фільтрація шумів, а також шифрування даних відповідно до політик інформаційної безпеки. Для цього залучаються edge-сервери, розміщені поблизу сенсорного рівня. Це дозволяє суттєво скоротити час реакції системи та уникнути перевантаження магістральних каналів зв'язку.

Третій рівень – аналітичний – є ядром технології підтримки прийняття рішень. Тут застосовуються методи штучного інтелекту, зокрема convolutional neural networks (CNN), які забезпечують розпізнавання об'єктів, а також recurrent neural networks (RNN), що дозволяють моделювати часові залежності у відеопотоці. Додатково застосовуються моделі виявлення аномалій (anomaly detection models), які навчаються на основі історичних даних та формують алгоритми ідентифікації підозрілої або небезпечної поведінки. Це можуть бути моделі виявлення падіння людини, залишених предметів, натовпу в забороненій зоні тощо.

Аналітична підсистема також повинна включати механізми самонавчання, щоб адаптуватися до нових умов і сценаріїв. Наприклад, у громадському транспорті система може адаптуватися до типових годин пік, виключаючи хибнопозитивні спрацювання. При цьому вона повинна зберігати здатність до виявлення дійсно небезпечних ситуацій, що відхиляються від норми, включаючи конфлікти, спроби крадіжок або вандалізм.

Інтерфейс управління забезпечує зручну взаємодію оператора з системою. Він має включати візуалізацію відеопотоків, підсвічування критичних подій, систему тривожних повідомлень та рекомендацій щодо дій. Наприклад, у випадку виявлення несанкціонованого входу в заборонену зону система може автоматично запропонувати виклик служби безпеки або поліції, зафіксувати інцидент, зберегти фрагмент відео та внести запис до журналу подій.

Особливу увагу слід приділити обчисленням на периферії (edge computing), які суттєво підвищують ефективність функціонування системи. Виконання аналітики безпосередньо на edge-пристроях дозволяє не лише зменшити затримку, а й покращити рівень автономності. У разі аварійного відключення мережі або центрального сервера система продовжуватиме працювати в локальному режимі, що критично важливо для об'єктів стратегічного значення.

У сучасних реалізаціях таких систем все більше використовуються гібридні моделі, що комбінують edge-аналітику з хмарними технологіями (cloud computing). Наприклад, первинне виявлення події може виконуватись локально, а глибокий аналіз і архівування – на віддаленому сервері. Це дозволяє балансувати між швидкістю обробки, точністю моделей і економічністю рішень.

Інтеграція з іншими інформаційними системами є важливою умовою ефективності запропонованої технології. Система підтримки прийняття рішень має взаємодіяти з базами біометричних даних, системами контролю доступу, реєстрами транспортних засобів, геоінформаційними системами тощо. Це забезпечує ширший контекст для аналізу ситуацій та дає змогу здійснювати перехресну верифікацію інформації.

Управління безпекою даних є критичним аспектом систем відеоспостереження. Потрібно забезпечити конфіденційність, цілісність і доступність відеоданих шляхом застосування методів шифрування, цифрових підписів, політик контролю доступу, журналювання дій користувачів та регулярного аудиту систем. У системах з високими вимогами безпеки варто також реалізовувати функції автоматичного виявлення атак або втручання у відеопотоки.

Ще однією важливою складовою є адаптивність системи до середовища функціонування. Наприклад, в умовах великого міста з високим рівнем шуму та постійною змінюваністю освітлення, система має динамічно регулювати чутливість, частоту кадрів та параметри алгоритмів розпізнавання. Такі можливості забезпечуються за рахунок поєднання сенсорних даних із аналітичними модулями, що самооновлюються.

Для забезпечення масштабованості платформи доцільно використовувати модульну структуру програмного забезпечення, що дозволяє легко оновлювати або замінювати окремі компоненти без порушення роботи всієї системи. Це спрощує технічне обслуговування, адаптацію до нових нормативів та швидке впровадження інновацій.

Реалізація описаної інформаційної технології може істотно підвищити рівень безпеки у місцях масового скупчення людей, транспортній інфраструктурі, навчальних закладах, промислових об'єктах та житлових комплексах. Водночас вона здатна забезпе-

чити більш ефективну реакцію на надзвичайні ситуації, зменшити кількість хибних викликів і підвищити довіру громадян до систем відеомоніторингу.

Удосконалення представленої системи можливе шляхом впровадження технологій глибокого навчання з підкріпленням (reinforcement learning), які дозволяють системі самостійно навчатися приймати оптимальні рішення на основі досвіду взаємодії з навколишнім середовищем. Наприклад, у транспортній інфраструктурі така система може автоматично змінювати правила контролю трафіку або пріоритети сигналів у разі виявлення заторів, аварій чи скупчення пішоходів. Це підвищує адаптивність системи та дозволяє розширити її функціональність за межі традиційного спостереження.

Значна роль у розвитку інформаційної технології для відеоспостереження належить інтеперабельності, тобто здатності ефективно взаємодіяти з іншими цифровими системами – охоронними, екстреними, логістичними, екологічними тощо. Забезпечення міжсистемної сумісності потребує дотримання міжнародних протоколів обміну даними (ONVIF, RTSP, MQTT) та підтримки відкритих API, що дозволяє уникати технологічної ізоляції і полегшує масштабування. Така сумісність особливо важлива в умовах реалізації проєктів Smart City, де відеоспостереження є лише однією зі складових великої інфраструктурної екосистеми.

Крім того, одним з перспективних напрямів є впровадження прогнозової аналітики, яка базується на використанні історичних даних для передбачення потенційних подій, що можуть мати негативні наслідки. Наприклад, система може аналізувати динаміку поведінки у певній локації та на основі шаблонів минулих подій формувати прогноз щодо ймовірності правопорушення або аварійної ситуації. Це дає можливість органам правопорядку та адміністраціям об'єктів не лише реагувати на події, а й запобігати їм завдяки випереджувальним діям.

Не менш важливим є забезпечення етичного аспекту функціонування системи відеоспостереження. Широке впровадження технологій автоматичного розпізнавання облич, поведінкової аналітики та біометричної ідентифікації викликає занепокоєння з боку правозахисників і громадянського суспільства. Тому розробники та впроваджувачі таких рішень повинні дотримуватися принципів прозорості, підзвітності та відповідності чинному законодавству щодо захисту персональних даних (GDPR, Закон України «Про захист персональних даних» тощо).

Важливо також враховувати роль користувача у загальній структурі системи. Хоча автоматизація є ключовим елементом сучасної аналітики, людський фактор залишається визначальним у прийнятті остаточного рішення у складних або непередбачуваних ситуаціях. Тому оператори систем мають бути належним чином підготовлені до взаємодії з інтерфейсом, розуміти логіку роботи аналітичних модулів та вміти коректно трактувати надану інформацію. Це вимагає системного підходу до навчання персоналу, впровадження симуляційних тренажерів і розробки адаптивних навчальних програм.

**Висновки.** У процесі дослідження було доведено, що сучасні виклики у сфері безпеки потребують принципово нових підходів до організації відеоспостереження, зокрема — переходу від пасивного спостереження до активної підтримки прийняття

рішень. Запропонована інформаційна технологія базується на багаторівневій архітектурі, що включає сенсорний рівень збору даних, обчислювальні вузли з елементами edge-обробки, аналітичні модулі з використанням алгоритмів штучного інтелекту, а також засоби інтерфейсної взаємодії з користувачем. Важливою перевагою такого підходу є здатність системи до функціонування в реальному часі, адаптації до змін середовища, самонавчання, а також інтеграції з іншими цифровими екосистемами. Впровадження технології дозволяє автоматизувати виявлення загроз, оптимізувати ресурси операторів, зменшити кількість хибних спрацьовувань і забезпечити вищу якість реагування на критичні події.

Комплексність розробленої концепції полягає у її здатності об'єднувати технічну, програмну, організаційну та етичну складові функціонування сучасної системи відеоспостереження. У статті обґрунтовано, що поєднання AI-аналітики, edge computing, інтеграційних можливостей з геоінформаційними системами, базами даних, модулями біометрії та контролю доступу створює основу для створення нової генерації безпекових рішень. Представлена інформаційна технологія є перспективною для використання в умовах реалізації концепції «розумного міста», захисту об'єктів критичної інфраструктури, автоматизованих логістичних центрів та об'єктів підвищеного ризику. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію моделі в реальних умовах, розробку універсальних протоколів взаємодії та створення нормативного регулювання щодо її впровадження з урахуванням стандартів конфіденційності та захисту персональних даних.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Alshammari M., Ahmad M.W., Shah S.A.A. Deep learning-based person re-identification and anomaly detection for smart surveillance systems // *IET Image Processing*. – 2023. – Vol. 17, Issue 4. – P. 259–273. – Режим доступу: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ipr2.12720>
2. Pratt I. Artificial Intelligence and Video Surveillance // *Philosophical Archive*. – 2023. – Режим доступу: <https://philarchive.org/archive/PRAAIV-2>
3. Hanwha Vision. Public Surveillance and AI: The Challenges of Balancing Safety and Ethics in Smart Cities // *Hanwha Vision News Center*. – 2024. – Режим доступу: <https://www.hanwhavision.com/vn/news-center/1576882>
4. Luna A., Tortonesi M., Paganelli F. A Cloud-based Architecture for Smart Video Surveillance // *ResearchGate*. – 2017. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/320039476\\_A\\_CLOUD-BASED\\_ARCHITECTURE\\_FOR\\_SMART\\_VIDEO\\_SURVEILLANCE](https://www.researchgate.net/publication/320039476_A_CLOUD-BASED_ARCHITECTURE_FOR_SMART_VIDEO_SURVEILLANCE)
5. Журомська М.В. Технологічне підґрунтя та виклики відеоаналітики в міському просторі // *Науковий журнал «Інформаційні технології та проектування»*. – 2020. – № 1(8). – С. 44–49. – Режим доступу: [http://journal.nitip.com.ua/media/uploads/documents/8\\_1\\_20.pdf](http://journal.nitip.com.ua/media/uploads/documents/8_1_20.pdf)
6. Вакалюк Т.А. Інформаційні технології інтелектуального відеоспостереження: проблеми та перспективи // *Modern Development of Education and Science*. – 2023. – № 5. – Режим доступу: <https://mdes.khmnu.edu.ua/index.php/mdes/article/view/446>

REFERENCES

1. Alshammari M., Ahmad M.W., Shah S.A.A. Deep learning-based person re-identification and anomaly detection for smart surveillance systems // IET Im-age Processing. – 2023. – Vol. 17, Issue 4. – P. 259–273. – Rezhym dostupu: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ipr2.12720>
2. Pratt I. Artificial Intelligence and Video Surveillance // Philosophical Archive. – 2023. – Rezhym dostupu: <https://philarchive.org/archive/PRAAIV-2>
3. Hanwha Vision. Public Surveillance and AI: The Challenges of Balancing Safety and Ethics in Smart Cities // Hanwha Vision News Center. – 2024. – Re-zhym dostupu: <https://www.hanwhavision.com/vn/news-center/1576882>
4. Luna A., Tortonesi M., Paganelli F. A Cloud-based Architecture for Smart Vid-eo Surveillance // ResearchGate. – 2017. – Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/320039476\\_A\\_CLOUD-BASED\\_ARCHITECTURE\\_FOR\\_SMART\\_VIDEO\\_SURVEILLANCE](https://www.researchgate.net/publication/320039476_A_CLOUD-BASED_ARCHITECTURE_FOR_SMART_VIDEO_SURVEILLANCE)
5. Zhuromska M.V. Tekhnolohichne pidgruntia ta vyklyky videoanalyky v miskomu prostori // Naukovyi zhurnal «Informatsiini tekhnolohii ta proiektuvannia». – 2020. – № 1(8). – S. 44–49. – Rezhym dostupu: [http://journal.nitip.com.ua/media/uploads/documents/8\\_1\\_20.pdf](http://journal.nitip.com.ua/media/uploads/documents/8_1_20.pdf)
6. Vakaliuk T.A. Informatiini tekhnolohii intelektualnoho videospostere-zhennia: problemy ta perspektyvy // Modern Development of Education and Science. – 2023. – № 5. – Rezhym dostupu: <https://mdes.khmnu.edu.ua/index.php/mdes/article/view/446>

Received 30.05.2025.

Accepted 03.06.2025.

***Information technology for decision support in the field of video surveillance***

*The article explores the concept of developing a modern information technology system designed to provide effective decision support in the field of video surveillance. Given the increasing volume of video data generated by monitoring systems, especially in urban environments, there is a growing need for high-performance solutions capable of operating in real time. The focus is placed on analyzing technological approaches to video stream processing using artificial intelligence, machine learning methods, edge computing, and cloud-based solutions. The study presents an architectural model of a multi-level information system that includes modules for data collection, preprocessing, analytics, and decision-making. Special attention is given to event detection algorithms and the classification of behavioral patterns, which helps reduce dependence on human intervention during surveillance analysis.*

*The paper also examines aspects of integrating such systems with other information-analytical platforms, including biometric databases, geographic information systems, and access control systems. The advantages of edge architectures are substantiated, as they reduce video processing latency, enhance system autonomy, and lower the load on central infrastructure. The research findings can be applied to the development of next-generation intelligent security systems, particularly within the framework of the Smart City concept. The proposed approach can be adapted to meet the needs of local authorities, law enforcement agencies, and private sector entities involved in the protection of critical infrastructure. The results*

*demonstrate the practical value of implementing advanced IT solutions in the domains of security and monitoring.*

*Keywords: video surveillance, information technology, decision support, security, AI, machine learning, edge computing, data analytics, system integration, automatic detection.*

**Суковенко Костянтин Георгійович** - аспірант кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій Дніпровського національного університету ім.Олеся Гончара.

**Sukovenko Kostyantyn** - postgraduate of Department of Cyber Security and Computer-Integrated Technologies of Dnipro National University Oles Honchar.

М.Д. Зінченко, О.Ю. Потап, А.А. Бурчак,

М.В. Михайловський, В.І. Шибакінський, Л.Х. Іванова

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ НА РЕЙКОБАЛОЧНИХ ТА ВЕЛИКОСОРТНИХ СТАНАХ

*Анотація. Метою роботи є дослідження умов різання останньої штанги мірної довжини та залишку прокату в умовах нестабільної довжини розкату, що реалізуються як наслідок коливань розмірів заготовок та температурного режиму прокатки. Розкат ріжеться на штанги однієї мірної довжини відповідно замовленню, але коливання довжини розкату призводить до того, що остання штанга може бути або збільшеною, або скороченою. Якщо штанга збільшена, то величина залишку може бути занадто великою і, щоб не втрачати придатний прокат і не переводити залишок у відходи, останню штангу і залишок ріжуть на дві штанги нормальної довжини. В роботі показано, що величина залишку, починаючи з якого треба різати на дві штанги нормальної довжини, визначається економічною доцільністю, що дорожче – штанга мірної довжини та залишок або дві штанги нормальної довжини. Наведено вираз для отримання величини залишку в залежності від міри штанги мірної довжини, коефіцієнтів вартості штанг нормальної довжини та відходів. Для умов прокатки швелера 24 на стані 800 величина залишку складає 0,86 м. Показано, що для забезпечення максимального прибутку в залежності від величини залишку, остання штанга мірної довжини може бути порізана такими способами: на штангу мірної довжини та залишок, на дві штанги нормальної довжини або на штангу мірної довжини та штангу нормальної довжини.*

*Ключові слова: довжина розкату, різання, штанга мірної довжини, штанга нормальної довжини, залишок.*

**Постановка проблеми.** При виробництві сортового прокату на великосортних і рейкобалочних станах прокат поставляється штангами мірної довжини відповідно замовленню, кратної мірної довжини, немірної довжини. Прокат виготовляється довжиною в межах від 4 м до 11,7 або 12 м. Різання готового прокату здійснюється на пилах гарячої різки, при цьому застосовуються різні схеми розкрою прокату [1].

Колівання довжини розкату, які обумовлені коливаннями розмірів заготовки, температури розкатів, зносом валків і підшипників, призводять до того, що остання штанга виявляється або мірної довжини із залишком, або скороченою, тобто немірної довжини. У випадку, якщо залишок перевищує величину технологічної обрізі, щоб запобі-

гти переводу у відходи придатного прокату, остання штанга мірної довжини і залишок ріжуться на дві штанги немірної нормальної довжини.

Однак виникає питання, починаючи з якої довжини залишку доцільно різати останню штангу мірної довжини і залишок на дві штанги немірної нормальної довжини.

**Аналіз останніх досліджень.** Для запобігання появи великих залишків, які можуть бути відправлені у відходи, на заготівельних станах застосовують різні схеми розкרוю прокату, що забезпечують різання його на штанги кратної довжини і тим самим без залишків розкрій прокату на пилах.

Але для станів, які виробляють товарну продукцію, такі схеми застосувати не можна. Наприклад, середньосортний стан 550 має довжину розкату на пилах з урахуванням передньої і задньої технологічної обрізі десь 50 м. Різання на штанги мірної довжини 12 м забезпечує отримання 4-х штанг з одного розкату. При коливаннях довжини розкату може бути отримана остання штанга нормальної довжини при скороченні довжини розкату і отримані дві штанги нормальної довжини замість останньої мірної штанги, якщо довжина розкату буде збільшена. І таким чином з'являється десь приблизно 25% штанг нормальної довжини.

Колівання довжини розкатів на станах гарячої прокатки обумовлені головним чином коливаннями температури розкату, які впливають на силу прокатки, пружну деформацію елементів прокатної кліти і валків, що призводить до змінення товщини розкату і, тим самим, його довжини.

В рейкобалочному цеху технологічний процес реалізований наступним чином. Розкат після прокатки на блюмінгу ріжеться на парогідравлічному ножі на частини, які транзитом без проміжного підігріву поступають на стан 800. В залежності від типу прокату різання може виконуватися на дві і більше частин, які прокатуються послідовно одна за одною, в результаті чого кожна наступна частина за рахунок остигання має температуру нижчу, ніж попередня, що призводить до збільшення товщини розкату і зменшення довжини розкату. Наприклад, при прокатці швелера 24 різниця в товщині між частинами в залежності від кількості частин складала 0,3-0,5 мм, різниця в масі погонного метра – 0,7-1,0 кг [2].

На середньосортному стані 550 нагрів заготовок здійснюється у двох нагрівальних печах, що створює коливання температури заготовок. Крім цього, нагрівання заготовок різної довжини теж призводить до появи коливань температури - короткі заготовки нагріваються до більш високій температури [3]. Коливання товщини прокату на стані для різних профілів складають до 0,2 мм, коливання довжини прокату  $\pm 0,35-0,8$  м.

**Основний матеріал дослідження.** В таблиці 1 наведені експериментальні дані коливань довжини розкатів, які отримані на різних прокатних станах [4]. Стан 550-1 – це стан з лінійним розташуванням прокатних клітей. При прокатці на подібних станах дуже часто виникають затримки розкатів в лінії стана, що призводить до коливань температури розкатів. Стан 800 теж лінійного типу, але коливання температури тут відбуваються за рахунок остигання частин розкатів після різання на парогідравлічному ножі. Стан 550-2 – це стан з послідовним розташуванням прокатних клітей, які розташовані в

дві лінії. Причини коливань температури: нагрів в двох печах, різна довжина заготовок, затримки при прокатці. Але цей стан оснащений прокатними клітьми з підвищеною жорсткістю за рахунок попереднього напруження клітей, що зменшує пружну деформацію елементів клітей та вплив температури на товщину розкатів.

Таблиця 1

Параметри гістограм довжини розкату

№ з/п	Профіль	Серед- не знач. м	Дис- пер- сія, м <sup>2</sup>	СКВ* м	Три СКВ, м	Міні- мальне знач. м	Мак- сим. знач. м	Різ- ниця, м
1	Швелер 12,ст.550-1	51,30	0,144	0,38	1,14	50,4	52,08	1,68
2	Кутик 80 ст.550-1	50,06	0,11	0,33	0,99	49,28	50,60	1,32
3	Швелер 24 стан 800, уся вибірка	87,99	6,00	2,45	7,35	82,17	90,80	8,63
4	Швелер 24 стан 800, 1 частина	90,02	0,299	0,55	1,64	89,1	90,80	1,7
5	Швелер 24 стан 800, 2 частина	88,62	1,53	1,24	3,71	87,2	90,10	2,9
6	Швелер 24 стан800, 3 частина	85,30	5,69	3,39	7,17	82,17	87,40	5,23
7	Кутик 90, стан 550-2	46,11	0,236	0,49	1,46	44,95	46,85	1,90
8	Швелер 10 стан 550-2	49,49	0,014	0,12	0,35	49,32	49,72	0,40
9	Швелер 14 стан 550-2	36,44	0,017	0,13	0,39	36,26	36,76	0,5
10	Швелер 16 стан 550-2	36,79	0,072	0,27	0,80	35,66	37,16	1,5

\*СКВ – середньоквадратичне відхилення

З таблиці 1 виходить, що коливання довжини розкатів, які обумовлені коливаннями температури розкатів, відбуваються для стана 550-1 в межах  $\pm 1$  м, для стана 800 –  $\pm 3,71$  м, коливання довжини 3-ої частини обумовлені коливаннями маси злитка, для стана 550-2 коливання значно менше – від  $\pm 0,35$  до  $\pm 0,8$  м. Ці коливання довжини розкатів призводять при різанні на пилах до появи штанг нормальної довжини.

В таблиці 2 наведений аналіз процесу різання на пилах розкатів швелера 24, який виконаний для довжин розкатів, що були отримані за результатами експериментальних досліджень на стані 800. При проведенні експериментальних досліджень вимірювалась довжина розкатів, на пилах відбирались проби розкатів, які обмірювались та зважувались, щоб визначити масу погонного метра.

Різання відбувалось на довжину мірних штанг 11 м. Виходячи з цього порахували, яка буде кількість штанг мірної довжини, їх довжина та маса, штанг нормальної довжини, їх довжина та маса, а також довжина та маса залишків.

Сума довжин технологічної обрізі переднього і заднього кінців складала 1,6 м.

Таблиця 2

Експериментальні дані довжини розкату, штанг мірної та нормальної довжини, їх мас, які отримані при прокатці на стані 800 швелера 24

№ з/п	Дов- жи-на розка- ту  м	Маса погон. метра,  кг	Маса розка- ту  кг	Дов- жи-на мір- них штанг  , м	Маса мір- нихш- танг,  кг	Дов- жи-на нор- маль- них штанг  , м	Маса нор- маль- них штанг  , кг	Дов- жи-на за- лиш- ку  м	Маса за- лиш- ку  кг	Маса обрізі,  кг
1	88,3	22,99	2004	77	1770	9,7	223	—	—	36,78
2	89,1	23,76	2117	77	1829	10,5	249	—	—	38,02
3	88,1	24,51	2159	77	1887	9,5	232	—	—	39,22
4	82,17	24,3	1997	66	1603	14,57	354	—	—	38,88
5	89,9	23,02	2069	88	2025	—	—	0,3	6,91	36,83
6	88,8	22,43	1992	77	1727	10,2	228	—	—	35,89
7	82,37	24,47	2016	66	1615	14,77	361	—	—	39,15
8	90,8	22,56	2048	88	1985	—	—	1,2	27,01	36,1
9	87,2	23,18	2021	77	1784	8,6	199	—	—	37,09
10	86,07	24,16	2079	77	1860	7,47	180	—	—	38,66
11	90,1	22,71	2046	88	1998	—	—	0,5	11,36	36,34
12	90	22,42	2018	88	1972	—	—	0,4	8,97	35,87
13	86,87	24,05	2089	77	1851	8,27	198	—	—	38,48
14	90,2	23,27	2099	88	2047	—	—	0,6	13,97	37,23
15	90,1	23	2072	88	2024	—	—	0,5	11,5	36,8
16	87,4	24,15	2111	77	1859	8,8	212	—	—	38,64
17	90	23,23	2091	88	2044	—	—	0,4	9,29	37,17
18	87,5	23,59	2064	77	1816	8,9	209	—	—	37,74
19	86,9	24,01	2086	77	1848	8,3	199	—	—	38,42
%	100		100	90,79	90,74	7,15	7,27	0,23	0,23	1,82

Таким чином експериментальні дослідження свідчать, що коливання довжини розкатів відбуваються в значних межах та призводять до появи, крім технологічної обрізі, штанг нормальної довжини і залишків.

**Метою дослідження** є аналіз умов процесу різання для забезпечення максимального прибутку при реалізації виробленого прокату.

Зрозуміло, що необхідно виходити з економічної доцільності, що коштує дорожче: штанга мірної довжини і залишок або дві штанги нормальної довжини. При цьому треба враховувати обмеження, які накладаються обладнанням, технологічним процесом прокатки та процесом різання розкату на пилах.

Ця умова може бути записана у наступному вигляді:

$$Cl_m + K_{отх}Cl_x = K_{норм}C(l_m + l_x), \quad (1)$$

де  $C$  – вартість 1 т штанг мірної довжини;  $l_m$  – довжина штанги мірної довжини;  $l_x$  – довжина залишку;  $K_{відх}$  – коефіцієнт вартості відходів;  $K_{норм}$  – коефіцієнт вартості штанг нормальної довжини.

Коефіцієнти вартості відходів і штанг нормальної довжини визначаються відносно вартості штанг мірної довжини і є безрозмірними.

Після перетворення виразу (1) отримаємо вираз для залишку  $l_x$ :

$$l_x = \frac{(1 - K_{норм})}{(K_{норм} - K_{відх})} l_m. \quad (2)$$

Можуть бути застосовані різні схеми різання залишку готового розкату в залежності від його довжини: різання на штангу мірної довжини і залишок, різання на дві штанги нормальної довжини, різання на штангу мірної довжини і штангу нормальної довжини. Але при цьому необхідно дотримуватися умови, щоб вартість отриманих після різання штанг була максимальною.

На рис. 1 наведені залежності умовної вартості прокату при різанні залишку за вказаними вище схемами різання для профілю швелер 24, які отримані для штанги мірної довжини 11,7 м і коефіцієнтів вартості  $K_{норм} = 0,94$ ,  $K_{відх} = 0,12$ . Значення коефіцієнтів обрані виходячи з цін на прокат мірної і нормальної довжини та відходи. Довжина залишку, при якому прокат доцільно різати на дві штанги нормальної довжини складає 0,86 м.

Залежність 1 відповідає випадку різання на штангу мірної довжини і залишок, залежність 2 відповідає випадку різання на дві штанги нормальної довжини, залежність 3 відповідає випадку різання на штангу мірної довжини і штангу нормальної довжини.

Залежність 1 побудована за виразом:

$$V = l_m + K_{відх} * l_x. \quad (3)$$

Залежність 2 побудована за виразом:

$$V = K_{норм} (l_m + l_x). \quad (4)$$

Залежність 3 побудована за виразами:

$$\begin{aligned} V &= l_m + K_{відх} l_x, \text{ якщо } l_x \leq l_{норм.min} \\ V &= l_m + K_{норм} l_x, \text{ якщо } l_x \geq l_{норм.min} \end{aligned} \quad (5)$$

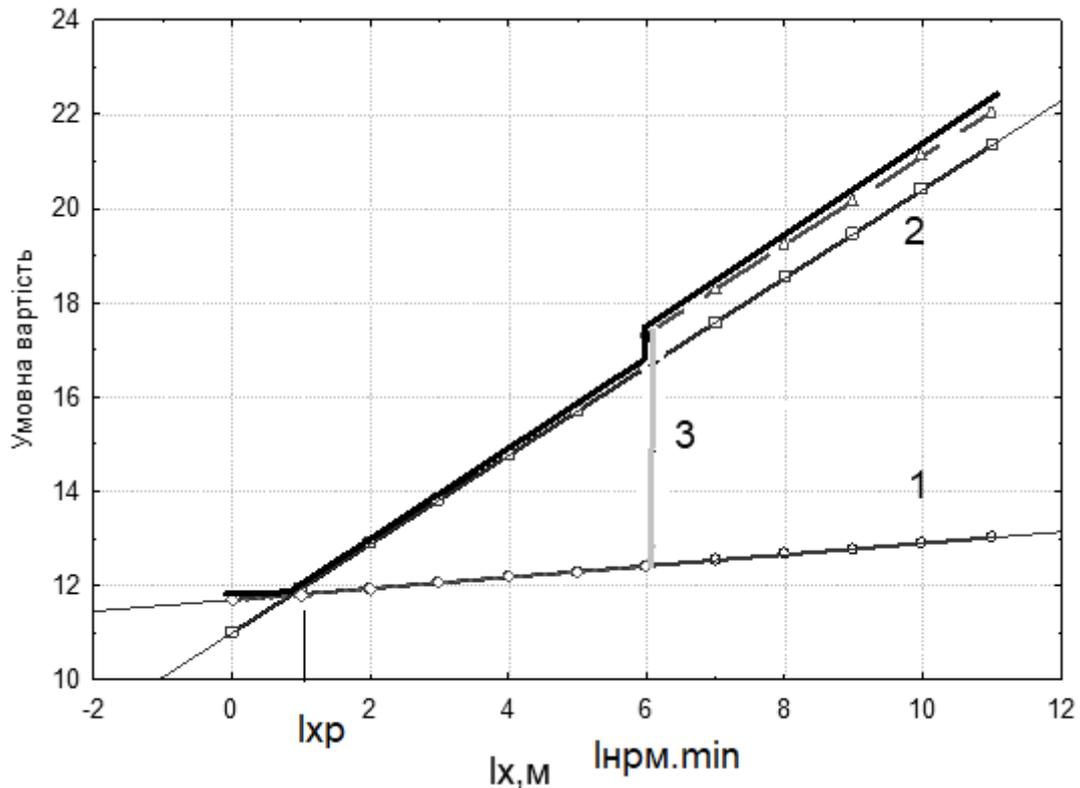


Рисунок 1 - Залежність умовної вартості від довжини залишку  
 $l_{xp}$  – розрахункове значення залишку,  $l_{нрм.min}$  – мінімальне значення довжини штанги нормальної довжини

Залежність 3 має ламаний характер, це обумовлено тим, що мінімальна довжина штанги нормальної довжини за технологічними умовами для швелера 24 становить 6 м. Тому, поки залишок не перевищує величину мінімального значення довжини штанги нормальної довжини дана залежність повторює залежність 1, тобто є мірна довжина штанги і залишок. Як тільки залишок стане рівним мінімальному значенню штанги нормальної довжини і, далі, залежність 3 йде паралельно і вище залежності 2.

Очевидно, що ламана крива, яка обмежує вказані залежності, забезпечуватиме максимальний рівень доходу, а це вказує на те, що для отримання максимального доходу в залежності від величини залишку необхідно застосовувати різні схеми різання залишку.

На рис. 2 наведена залежність залишку від коефіцієнту вартості штанг нормальної довжини, яка показує яким повинен бути залишок, після якого може бути виконано економічне доцільне різання на штанги нормальної довжини. Ця залежність описується рівнянням

$$l_x = 39,29 - 66,74x + 27,48x^2. \quad (6)$$

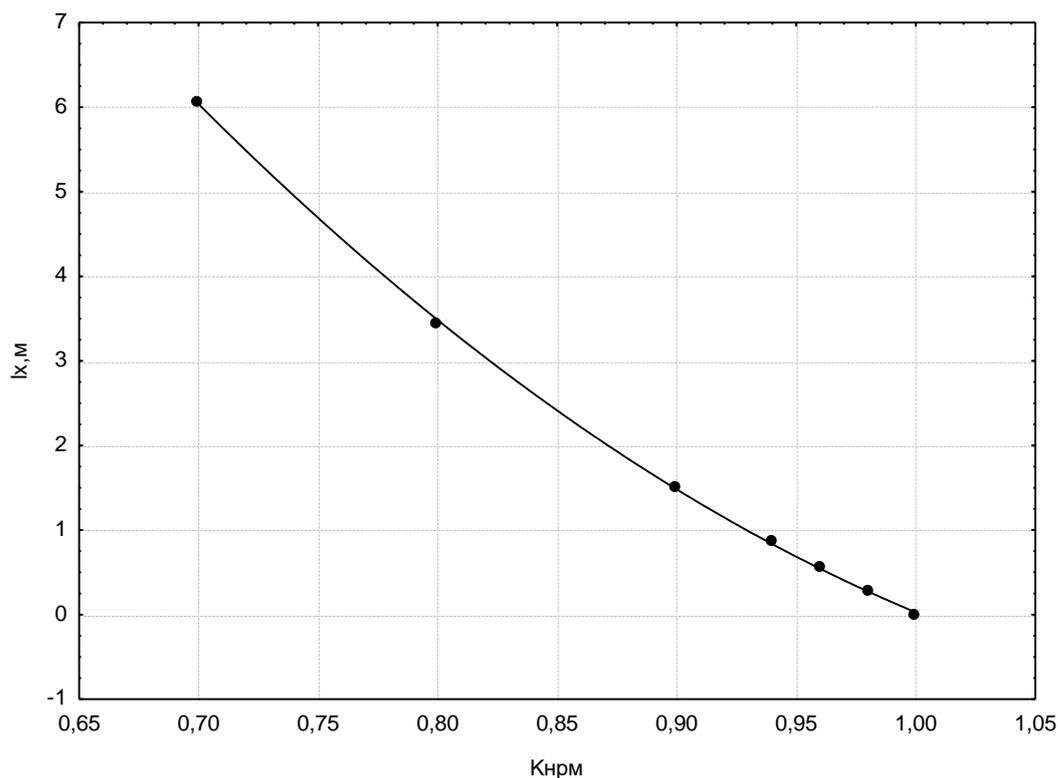


Рисунок 2 - Залежність величини залишку від коефіцієнту вартості штанг нормальної довжини

**Висновки.** Аналіз процесу різання показав, що визначення різання останньої штанги та залишку на дві штанги нормальної довжини треба здійснювати в залежності від довжини залишку, яка залежить від довжини мірної штанги та коефіцієнтів вартості штанг нормальної довжини та відходів. Для забезпечення максимального рівня доходів від реалізації прокату треба різання розкату здійснювати такими способами: на штангу мірної довжини та залишок, на дві штанги нормальної довжини або на штангу мірної довжини та штангу нормальної довжини, але при цьому необхідно дотримуватися критерію максимальної вартості отриманих після різання штанг.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Технологічна інструкція з виробництва сортового прокату на стані 550-2 прокатного цеха № 2 ТІ 233-ПС-02-96. ДМЗ, 1997. 447 с.
2. Экспериментальное исследование точности процесса прокатки швеллеров на стане 800. Зінченко М.Д., Щербина Г.С., Устименко А.В., Григоренко Н.Д. Тезисы докладов и совещаний республиканской научно-практической конференции «Союз науки и практики к 100-летию Петровки», 1987 г., Днепропетровск, ДметИ. С.109-110.
3. Застосування непрямих методів оцінки змінення товщини прокату внаслідок впливу зношення обладнання прокатної кліти. Зінченко М.Д., Потап О.Ю., Шибакінский В.І. Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. УДУНТ, 2023. № 26. С. 38-51.
4. Экспериментальное исследование влияния параметров прокатки на длину раската. Зінченко М.Д., Тартачний В.С. Металлургическая и горнорудная промышленность, №

8-9, 2000. Труды 5-й Международной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства».

#### REFERENCE

1. Tekhnolohichna instruktsia z vyrobnytstva sortovogo prokatu na stani 550-2 prokatnogo tsekha № 2 TI 233-PS-02-96.DMZ. Dnipro, 1997. 447 s.
2. Eksperimentalnoe issledovanie tochnosti procesa prokatki shveleriv na stane 800. Zinchenko M.D., Scherbina G.S., Ustimenko A.V., Grigorenko N.D. Tezisy dokladiv i soveschaniï respublikansloi nauchno-prakticheskoi konferencii «Souz nauki i praktiki k 100-letiu Petrovki», 1987 g, Dnepropetrovsk, DMetI, S.109-110.
3. Zastosuvanna nepraymux metodiv ocinki zminennay tovschinu prokatu vnaslidok vpluvy znoshennay obladdnny prokatnoi kliti. Zinchenko M.D., Potap O.U., Shybakynskyi V.I. Suchasni problemu metalurgii. Naukovi visti. UDUNT, 2023, № 26, S. 38-51.
4. Eksperimentalnoe issledovanie vliayniay parametrov prokatki na dlinu raskata. Zinchenko M.D., Tartachny V.S. Metalurgicheskay i gornorudnay promyshlenoçt, № 8-9, 2000, Trudy 5 Mejdunarodnoi nauchno-texnicheskoi konferencii «Teoreticheskie problemy prokatnogo proizvodstva».

#### ***Research of the cutting process of rolled section steel on rail-beam and large-size rolling mills***

*The aim of the work is to study the conditions of cutting the last bar of the measured length and the remaining rolled product under conditions of unstable rolling length, which are realized as a result of fluctuations in the sizes of the blanks and the temperature regime of rolling.*

*The roll is cut into bars of the same measured length according to the order, but fluctuations in the length of the roll result in the last bar being either longer or shorter.*

*If the bar is increased, then the amount of the remainder may be too large and, in order not to lose suitable rolled product and not to transfer the remainder to waste, the last bar and the remainder are cut into two bars of normal length.*

*The work shows that the amount of the remainder, starting from which it is necessary to cut into two bars of normal length, is determined by economic feasibility, which is more expensive – a bar of measured length and a remainder or two bars of normal length.*

*An expression is given for obtaining the residual value depending on the size of the bar of the measured length, the cost coefficients of the bars of the normal length and waste. For the conditions of rolling the channel 24 on the mill 800, the remainder value is 0.86 m.*

*It is shown that to ensure maximum profit depending on the remainder value, the last bar of the measured length can be cut in the following ways: into a bar of the measured length and the remainder, into two bars of the normal length or into a bar of the measured length and a bar of the normal length.*

**Keywords:** *rolling length, cutting, bar of measured length, bar of normal length, remainder.*

Received 30.05.2025.  
Accepted 03.06.2025.

**Зінченко Михайло Дмитрович** - к.т.н., доцент, кафедра автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

**Потап Олег Юхимович** - к.т.н., професор, кафедра автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

**Бурчак Андрій Анатолійович** - старший викладач, кафедра автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

**Михайловський Микола Володимирович** - доцент, кафедра автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

**Шибакінський Володимир Іванович** - доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

**Іванова Людмила Харитонівна** - доктор технічних наук, професор, Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій.

**Zinchenko Mykhailo Dmytrovych** – Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

**Potap Oleh Yukhymovych** – Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

**Burchak Andrii Anatoliyovych** – Senior Lecturer of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

**Mykhailovskyi Mykola Volodymyrovych** – Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

**Shybakinskyi Vladimir Ivanovych** – Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

**Yvanova Lyudmyla** - doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, Ukrainian state university of science and technologies.

О.Д. Федоренко, В.Ю. Клим, С.В. Клименко

## НЕПАРАМЕТРИЧНА СТАТИСТИКА ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН З НЕВІДОМИМИ ФУНКЦІЯМИ РОЗПОДІЛУ ЙМОВІРНОСТІ

*Анотація.* Робота присвячена актуальній проблемі аналізу даних з невідомими розподілами, де класичні параметричні методи неефективні. На прикладі двох типів розподілів (логістичного(симетричного) та експоненційного(асиметричного)) показано застосування непараметричного підходу, який складається з етапів ранжування та аналізу екстремальних значень. Мета дослідження: проведення якісного аналізу щодо статистичної однорідності часових рядів через оцінку основних спеціальних критеріїв вибірок - зсувів та масштабів. Методи дослідження: в роботі використані базові методи непараметричної статистики: для вибірок з логістичним та експоненційним законом розподілення знайдено їх статистичні параметри, перевірка на статистичну однорідність виконана за результатами аналізу розрахункових значень спеціальних критеріїв. Практична новизна дослідження: наведений в роботі підхід для перевірки на статистичну однорідність розширює практичну площину застосування методів непараметричної статистики для комплексного статистичного аналізу часових рядів з законом розподілення відмінним від нормального. Сфери застосування: результати дослідження можуть знайти застосування в галузях, що потребують аналізу статистичної однорідності даних, зокрема в інжинірингу в задачах моніторингу стану технічних об'єктів та систем, у соціологічних дослідженнях для виявлення суттєвих відмінностей між групами, в медичній сфері для контролю якості лабораторних вимірювань.

*Ключові слова:* непараметрична статистика, статистична однорідність, розподіл випадкових величин, ранжування, середні значення, зсуви, масштаби, комп'ютерне моделювання.

**Вступ.** Сучасний статистичний аналіз стикається зі складними завданнями обробки даних, де традиційні параметричні методи часто виявляються недостатньо гнучкими або застосовними. Особливо це стосується випадків, коли закон розподілу випадкової величини невідомий або його важко визначити. У таких умовах на перший план виходять непараметричні методи, які не вимагають жорстких припущень щодо форми розподілу та дозволяють отримувати надійні результати навіть за обмеженої інформації [1].

Непараметрична статистика знайшла широке застосування в різних галузях – від економіки та біології до інженерії та соціальних досліджень. Її основна перевага поля-

гає в тому, що вона дозволяє аналізувати дані, які можуть бути неоднорідними, мати складну структуру або автокореляційні залежності. Це особливо важливо при роботі з реальними вибірками, де класичні підходи, такі як t-критерій, часто дають неточні результати через порушення їх припущень [1, 2].

В роботі непараметричний аналіз випадкових величин складається з послідовного виконання методу ранжування та подальшого опрацювання експериментальних значень (мінімумів і максимумів) у впорядкованих вибірках. Для дослідження були обрані два типи розподілів: симетричний (логістичний) та асиметричний (експоненційний). На прикладі різних типів розподілів продемонстрована можливість застосування непараметричного методу для вибірок з невідомими функціями розподілу, які не відповідають нормальному закону.

Оскільки важливою частиною дослідження є результати обчислювального експерименту з опрацювання реальних даних вимірювань, в роботі використані імітаційні моделі. Згенеровані вибірки з заданими параметрами та отримані значення статистичних характеристик: середні значення, мінімуми, максимуми, зсуви та масштаби. Подальший аналіз величин спеціальних критеріїв був спрямований на перевірку гіпотези про статистичну однорідність вибірок, що має важливе практичне значення для задач прогнозування та моделювання технічних систем або спостереження за природними об'єктами. Результати роботи можуть бути корисними для фахівців, які стикаються з невизначеністю у даних або потребують додаткових інструментів для комплексного статистичного аналізу часових рядів з законом розподілення відмінним від нормального. Наступні етапи роботи у визначеному напрямі мають бути пов'язані із дослідженням та вдосконаленням непараметричних методів та їх практичним застосуванням в заданих умовах.

**Актуальність.** У роботі [8] автор в задачі оптимізації алгоритмічного та програмного забезпечення автономних вимірювальних модулів розподілених діагностичних систем особливу увагу приділяють алгоритму перевірки однорідності діагностичних сигналів, що базується на комбінації критеріїв Фішера та Стьюдента. Запропонований підхід із застосуванням параметричних методів має певні вимоги щодо припущень про нормальність розподілу даних.

У дослідженні [9] аналізується вплив кореляції результатів спостережень на точність лінійної регресії. Автор пропонує методи врахування автокореляції для поліпшення оцінок дисперсії коефіцієнтів регресії та прогнозованих значень. Робота підкреслює важливість врахування взаємної кореляції даних, особливо під час обробки часових рядів. Однак викладені методи залишаються в рамках параметричної статистики, що обмежує їхню використання для даних із невідомими або складними розподілами.

Розглянуті роботи сучасних авторів підтвердили відомий висновок [1], про те, що параметричні методи вимагають суворих припущень щодо розподілу даних (наприклад, нормальність) і можуть бути неефективними в разі їх порушення.

Зазначимо, що класична математична статистика не розглядає комп'ютерну обробку експериментальних автокорельованих вимірювань в задачах спостереження за при-

родними та технічними об'єктами та процесами. Відома досить невелика кількість досліджень з вивчення інформативності критеріїв перевірки гіпотез в задачах спостереження за об'єктами [2 – 4]. Отже, з одного боку статистична обробка автокорельованих вимірювань з різними розмірами вибірок та невідомими статистичними закономірностями відомими спеціальними критеріями порівняння вибірок випадкових величин досліджена недостатньо. З іншого боку, дослідження статистичної однорідності через аналіз основних параметрів, таких як середні значення, мінімуми, максимуми, зсуви та масштаби, має вирішальне значення для прогнозування в таких сферах, як інженерні дослідження, економіка, медична статистика, коли важливо знати, чи зберігаються статистичні закономірності при зміні будь-яких умов [7].

Отже, аналіз автокорельованих вибірок випадкових величин є актуальною задачею, де вхідні дані мають складну структуру або існує залежність між спостереженнями. В таких випадках саме непараметричні методи, для яких знання закону розподілу не є обов'язковою вимогою, стають незамінними для обробки таких даних. Більш того, вони дозволяють отримувати результати навіть за умов обмеженої інформації про розподіл [1]. Таким чином, дослідження непараметричних методів аналізу ряду вибірок спостереження за станом технічних або природних об'єктів наразі є актуальною задачею.

Мета роботи полягає в проведенні тестового аналізу результатів застосування непараметричного методу для перевірки статистичної однорідності часових рядів через оцінку основних спеціальних критеріїв вибірок - зсувів та масштабів, а також дослідження застосовності такого підходу для попереднього визначення або додаткової перевірки статистичної однорідності вибірок часових рядів.

**Постановка задачі.** Для застосування методу непараметричної статистики для перевірки статистичної однорідності вибірок часових рядів були сформульовані наступні завдання:

- виконати імітаційне моделювання вибірок часових рядів з відомими законами розподілу;
- застосувати метод ранжування для отриманих даних;
- обчислити для кожної вибірки основні статистичні характеристики: середні значення, мінімуми, максимуми, а також основні спеціальні критерії: зсуви та масштаби.
- перевірити статистичну однорідність вибірок, тобто виконати детальний якісний та кількісний аналіз значень спеціальних критеріїв для кожного типу вибірок.

Методи статистичної обробки вимірів випадкових величин, закони розподілу ймовірності що невідомі, отримали назву непараметрична статистика. Вона вільна від знань функцій розподілу ймовірностей. Для будь-якої вибірки  $X(k/j)$  з  $N$  серій вимірювань ( $k=1,2,3\dots n$ ;  $n$ -розмір вибірки;  $j$ -номер вибірки,  $j=1,2,3\dots N$ ) знайдемо мінімальне і максимальне значення.

Напочатку перетворимо вибірку  $X(k/j)$  в упорядковану, яка має позначення  $X^*(i/j)$ . Для упорядкованих вибірок, де перша та остання мають відповідні позначення  $X^*$  та  $X^*(n/j)$  виконується умови наступних нерівностей ( $j=1,2,3\dots N$ )[2]:

$$X^*(1/j) < X^*(2/j) < \dots < X^*(k/j) < X^*(k+1/j) < \dots < X^*(n-1/j) < X^*(n/j). \#(1)$$

Для перетворення вибірки  $X(k/j)$  в упорядковану, необхідно визначити її ранги. Тобто ранг вказує на номер вимірів в  $X(i/j)$ . Формула для визначення рангів має наступний вигляд:

$$R(X(i/j)) = \sum_{k=1}^n \operatorname{sgn}(X(i/j) - X(k/j)), i = 1, 2, 3 \dots n \#(2)$$

Оскільки мінімальні та максимальні значення упорядкованої вибірки та  $X^*(n/j)$  також визначаються по їх рангам, то запишемо вирази в наступному вигляді:

$$X^*(1/nj) = X(i/nj) \sum_{i=1}^n \operatorname{sgn}(1 - R(X(i/j))), i = 1, 2, 3 \dots n; \#(3)$$

$$X^*(n/nj) = X(i/nj) \sum_{i=1}^n \operatorname{sgn}(R(X(i/j)) - n), i = 1, 2, 3 \dots n. \#(4)$$

де  $\operatorname{sgn}(x - a)$  – функція одиночного стрибка, яка дорівнює 1, якщо  $x \geq a$  та 0 якщо  $x < a$ ;  $j=1,2,3\dots N$ .

Виходячи з положень непараметричної статистики, що у вибірок, які досліджуються, середні статистичні, максимуми і мінімуми будуть теж статистично однорідні, разом із їх зсувами та масштабами тільки за умов однаковості їх статистичної закономірності [1-7], проведемо обчислювальний експеримент і дослідимо це припущення. Обчислювальні експерименти проведемо на вибірках двох видів функцій розподілу ймовірностей: логістичній (симетричній) і експоненційній (асиметричній):

$$F_L(X) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)\right)}; \#(5)$$

$$F_E(X) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right). \#(6)$$

Їх параметрам надамо наступних значень:  $a=3$ ,  $\sigma=0.5$ ,  $n=10$ ,  $N=10$ ,  $\lambda=3$ . Для них маємо однакове математичне очікування  $M[X_L] = 3$ ,  $M[X_E] = 3$ .

Вибірки вимірів отримані по вибіркам комп'ютерних генераторів  $\xi(k/j)$  із застосуванням програмного забезпечення Matlab, яке вільне у просторі інтернет. В результаті сформовані випадкові величини з рівномірним законом розподілення ймовірності  $W(\xi/j) = 1$ ,  $F(\xi/j) = 3$ ,  $0 \leq \xi \leq j$ . Надалі формуються вибірки для логістичного та

експоненціального закону розподілення -  $X_L(k/nj)$  та  $X_E(k/nj)$  - по вибіркам  $\xi(k/nj)$ , для яких надамо формули у вигляді:

$$X_L(k/nj) = a + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sigma \ln \left( \frac{\xi(k/nj)}{1 - \xi(k/nj)} \right), \#(7)$$

$$X_E(k/nj) = \lambda \ln \left( \frac{1}{1 - \xi(k/nj)} \right). \#(8)$$

Тепер визначимо їх ранги та відповідні мінімальні  $X_L^*(1/nj)$  і  $X_E^*(1/nj)$  і максимальні значення  $X_L^*(10/nj)$  і  $X_E^*(10/nj)$ .

Зсуви  $\bar{X}^*(j)$  та масштаби  $\Delta\bar{X}^*(j)$  для розглядуваних вибірок  $X_L(k/nj)$  та  $X_E(k/nj)$  знайдемо за наступними виразами:

$$\bar{X}^*(j) = \frac{1}{2} (X^*(1/nj) + X^*(n/nj)), \#(9)$$

$$\Delta\bar{X}^*(j) = (X^*(n/nj) - X^*(1/nj)). \#(10)$$

По вибіркам для першого обчислювального експеримента  $\xi_1(k/j)$  сформуємо вибірки  $X_L(k/j)_1$  і  $X_E(k/j)_1$  та дослідимо їх інформативні показники (середні, зсуви і масштаби):

$$\bar{X}_L(j)_1, \bar{X}_E(j)_1, \bar{X}_L^*(j)_1, \bar{X}_E^*(j)_1, \Delta\bar{X}_L^*(j)_1, \Delta\bar{X}_E^*(j)_1.$$

По вибіркам для другого обчислювального експеримента  $\xi_1(k/j)$  сформуємо вибірки  $X_L(k/j)_1$  і  $X_E(k/j)_1$  та дослідимо їх інформативні показники (середні, зсуви і масштаби):

$$\bar{X}_L(j)_1, \bar{X}_E(j)_1, \bar{X}_L^*(j)_1, \bar{X}_E^*(j)_1, \Delta\bar{X}_L^*(j)_1, \Delta\bar{X}_E^*(j)_1.$$

Результати проведених розрахунків по двом генераторам наведені у таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Значення середніх, зсувів і масштабів першого обчислювального експеримента для вибірок логістичного та експоненціального закону розподілення

j	$\bar{X}$	$\bar{X}_L(j)_1$	$\bar{X}_E(j)_1$	$\bar{X}_L^*(j)_1$	$\bar{X}_E^*(j)_1$	$\Delta\bar{X}_L^*(j)_1$	$\Delta\bar{X}_E^*(j)_1$
1		3.0864	2.8969	0.0864	-0.1031	2.7664	0.5197
2		2.6854	3.3555	-0.3146	0.3555	3.2530	1.1284
3		3.2054	2.9670	0.2054	-0.0330	3.0024	0.8830
4		2.7496	3.1032	-0.2504	0.1032	2.3909	1.4865
5		2.7863	3.1548	-0.2137	0.1548	3.3887	0.5828
6		3.1032	2.8910	0.1032	-0.1090	2.2818	0.7236
7		3.3907	2.8632	0.3907	-0.1368	2.2391	0.5661
8		2.3025	3.0213	-0.6975	0.0213	3.7311	1.2235
9		3.1413	2.9382	0.1413'	-0.0618	1.4847	1.0872
10		3.0883	3.0160	0.0883	0.0160	2.9273	0.9378

Таблиця 2

Значення середніх, зсувів і масштабів другого обчислювального експеримента для вибірок логістичного та експоненціального закону розподілення

j	$\bar{X}$	$\bar{X}_L(j)_2$	$\bar{X}_E(j)_2$	$\bar{X}_L^*(j)_2$	$\bar{X}_E^*(j)_2$	$\Delta\bar{X}_L^*(j)_2$	$\Delta\bar{X}_E^*(j)_2$
1		2.9292	3.0553	-0.0708	0.0553	5.1783	1.4375
2		3.4070	2.8882	0.4070	-0.1118	2.8731	0.8191
3		2.9838	3.1316	-0.0162	0.1316	2.8731	1.4817
4		2.9749	3.0083	-0.0251	0.0083	2.3137	1.0650
5		3.0387	3.0083	0.0387	0.1012	2.2233	1.6470
6		3.3540	2.7897	0.3540	-0.2103	2.2233	0.3335
7		2.6900	2.9021	-0.3100	-0.2103	2.3652	0.7231
8		2.9680	3.2342	-0.0320	0.2342	3.7560	1.1650
9		2.9680	2.9688	-0.1826	-0.0312	4.5195	0.9354
10		3.0157	2.9162	0.0157	-0.0838	2.1512	0.6083

Для параметрів упорядкованих вибірок  $\bar{X}^*(k/j)$  з метою подальшого детального аналізу додатково надамо їх графічне представлення (див. рис.1).

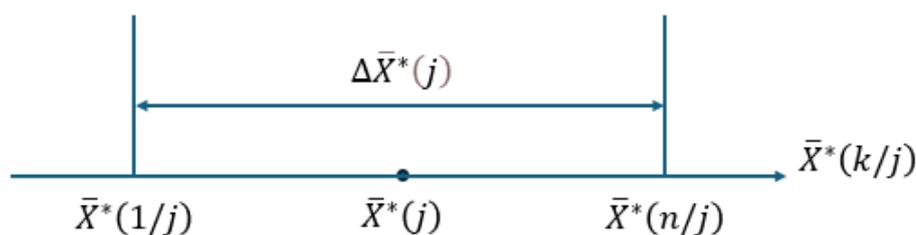


Рисунок 1 - Графічне представлення параметрів упорядкованих вибірок  $\bar{X}^*(k/j)$

Зведені загальні показники для двох обчислювальних експериментів за обраними законами розподілення показані в таблиці 3.

Таблиця 3

Зведені середні показники середніх, зсувів і масштабів першого та другого обчислювального експеримента для вибірок логістичного та експоненціального закону розподілення

j	$\bar{X}$	$\bar{X}_L(j)$	$\bar{X}_3(j)$	$\bar{X}_L^*(j)$	$\bar{X}_3^*(j)$	$\Delta\bar{X}_L^*(j)$	$\Delta\bar{X}_3^*(j)$
1		2.9539	3.0207	-0.0461	0.0207	2.7465	0.9139
2		3.0179	2.9996	0.0179	-0.0004	3.1152	1.0216

Для аналізу зведених значень інформативних параметрів в таблиці 3 використано t-тест для незалежних вибірок, який застосовується для порівняння двох різних експериментів. В результаті для двох різних експериментів за логістичним законом розподі-

лення отримано наступний рівень значущості середнього значення:  $p\text{-value} = 0.6072$ , відповідно для двох різних експериментів за експоненціальним законом -  $p\text{-value} = 0.7433$ . Вочевидь, вони не мають значних відмінностей для двох різних експериментів всередині одного закону розподілення.

Для подальшої перевірки на статистичну однорідність для двох різних експериментів також використано t-тест, в результаті якого отримані величини рівней значущості зсуву та масштабу наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Величини рівней значущості зсуву та масштабу для вибірок логістичного та експоненціального закону розподілення

Закон	Зсув	Масштаб
Логістичний	0.6072	0.3639
Експоненційний	0.7433	0.5272

Значення з таблиці 4 підтверджують статистичну однорідність за рахунок незначних відмінностей для двох різних експериментів за однаковим законом розподілення.

Для детального якісного та кількісного аналізу значень спеціальних критеріїв для кожного типу вибірок наведені графіки t-розподілення.

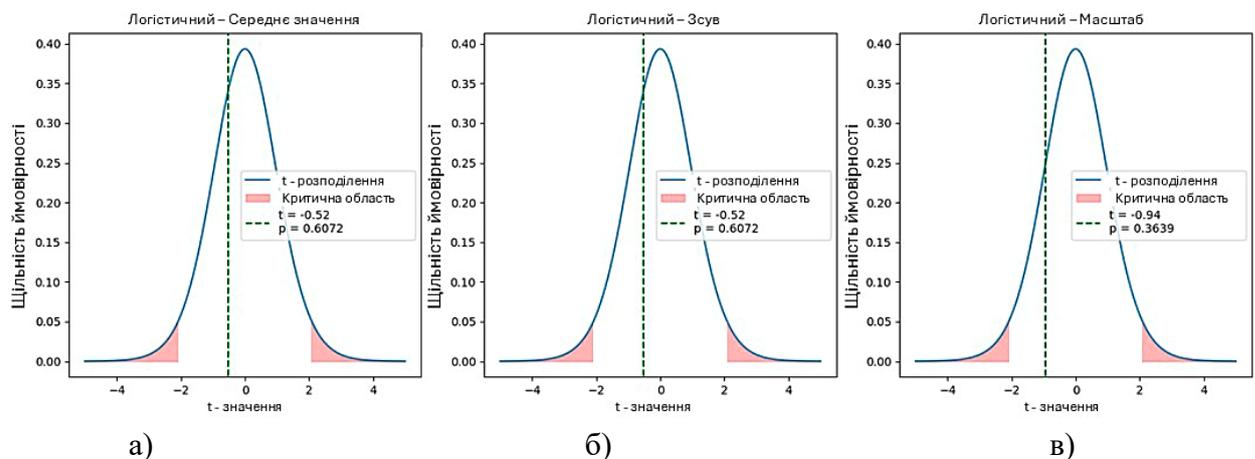


Рисунок 2 - Застосування t-тесту для перевірки на статистичну однорідність обчислювальних експериментів за логістичним законом розподілення:

а) - середнє значення; б) зсув; в) масштаб

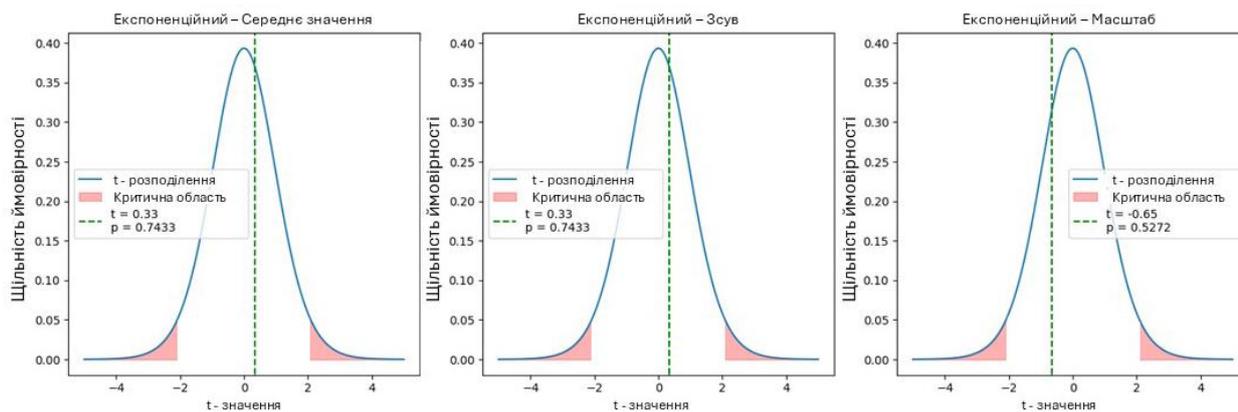


Рисунок 3 - Застосування t-тесту для перевірки на статистичну однорідність обчислювальних експериментів за експоненціальним законом розподілення:  
а) - середнє значення; б) зсув; в) масштаб

В результаті проведення t-аналізу для перевірки на статистичну однорідність, зокрема послідовного опрацювання спеціальних критерієв - середніх, зсувів та масштабів - розрахункові значення не показали значущих відмінностей між експериментами.

Отже, виконані розрахунки за припущеннями непараметричної статистики показали можливість застосування для перевірки статистичної однорідності для законів, відмінних від нормального, зокрема для симетричного (логістичний) та асиметричного (експоненціальний). Таким чином, наведений алгоритм розрахунку показав працездатність водночас із розрахунковою нескладністю для попередньої оцінки статистичної однорідності в заданих умовах.

**Висновки.** У роботі продемонстровано застосування методу непараметричної статистики для перевірки статистичної однорідності вибірок часових рядів, для яких закони розподілу невідомі або мають складну форму та відмінні від нормального. Поставлена задача вирішена поетапно: виконано імітаційне моделювання вибірок часових рядів з відомими законами розподілу логістичним (симетричним) та експоненційним (асиметричним), застосований метод ранжування для отриманих даних, для кожної вибірки обчислені основні статистичні характеристики - середні значення, мінімуми, максимуми, а також основні спеціальні критерії - зсуви та масштаби; перевірена статистична однорідність вибірок із застосуванням t-тесту.

Результати обчислювальних експериментів показали, що непараметричний аналіз основних статистичних характеристик та значень спеціальних критеріїв надає попередню якісну оцінку перевірки статистичної однорідності вибірок з законом розподілення відмінним від нормального, зокрема для логістичного (симетричного) і експоненційного (асиметричного). Наведений розрахунковий алгоритм застосованого непараметричного методу зручний для комп'ютерного моделювання – не потребує спеціалізованого програмного забезпечення та великих обчислювальних ресурсів, що постає певною перевагою в інженерних розрахунках для попереднього визначення або додаткової перевірки статистичної однорідності вибірок часових рядів. Результати роботи збільшують практичну площину застосування методів непараметричної статистики для комплекс-

ного статистичного аналізу часових рядів з законом розподілення відмінним від нормального. Подальші дослідження у визначеному напрямі будуть пов'язані із вдосконаленням непараметричних методів аналізу вибірок спостереження за станом технічних або природних об'єктів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Malaichuk, V., Klymenko, S., & Astakhov, D. (2023). Computer Processing of Measurements in Problems of Observation of the Condition of Technical Objects. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 99-106. <https://doi.org/10.15421/452213>
2. Kobzar, A. I. (2006). *Applied Mathematical Statistics: For Engineers and Researchers*. M.: Fizmatlit.– P. 816
3. GailF. FahoomeTwenty Nonparametric Statistics And Their Large Sample Approximations / *Journal of Modern Applied Statistical Methods*. No2, Wayne State University, 2002. p.248–268.
4. Hajek J. *Nonparametric Statistics*. Holden-Day, San Francisco, 1969. – P. 346.
5. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології. / уклад. М. М. Горонескуль. Харків: УЦЗУ, 2009. 90с.
6. Турчин В.М. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. пос. Дніпропетровськ: ІМА, 2014. 556 с.
7. Рогач І.М., Керецман А.О., Сіткар А.Д. Правильно вибраний метод статистичного аналізу – шлях до якісної інтерпретації даних медичних досліджень. Науковий вісник Ужгородського університету, серія «Медицина», випуск 2 (56), 2017 р. Режим доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/31008/1/25>.
8. Сисак Р.М. Оптимізація алгоритмічно-програмного забезпечення автономних вимірювальних модулів розподілених діагностичних систем, ISSN 1607-7970. Техн. електродинаміка. № 3, Київ 2018.
9. Дорожовець М. Дослідження впливу кореляції результатів спостережень на непевність коефіцієнтів та прогнозованих значень лінійної регресії, *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 69, Львів, 2008 р.

#### REFERENCES

1. Malaichuk, V., Klymenko, S., & Astakhov, D. (2023). Computer Processing of Measurements in Problems of Observation of the Condition of Technical Objects. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 99-106. <https://doi.org/10.15421/452213>
2. Kobzar, A. I. (2006). *Applied Mathematical Statistics: For Engineers and Researchers*. M.: Fizmatlit.– P. 816
3. GailF. FahoomeTwenty Nonparametric Statistics And Their Large Sample Approximations / *Journal of Modern Applied Statistical Methods*. No2, Wayne State University, 2002. p.248–268.
4. Hajek J. *Nonparametric Statistics*. Holden-Day, San Francisco, 1969. – P. 346.

5. Tables of functions and critical points of distributions. Sections: Probability theory. Mathematical statistics. Mathematical methods in psychology / compiled by. M. M. Goroneskul. Kharkiv: UCZU, 2009. 90с.
6. Turchyn V.M. Probability theory and mathematical statistics: a textbook. Dnipropetrovs'k: IMA, 2014. 556 с.
7. Rohach IM, Keretsman AO, Sitkar AD. Correctly chosen method of statistical analysis is the way to qualitative interpretation of medical research data. Scientific Bulletin of Uzhhorod University, series "Medicine", issue 2 (56), 2017. Access mode: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/31008/1/25>.
8. Sysak R.M. Optimization of algorithmic and software support of autonomous measuring modules of distributed diagnostic systems, ISSN 1607-7970. Techn. electrodynamics. No. 3, Kyiv 2018.
9. Dorozhovets M. Investigation of the influence of correlation of observation results on the uncertainty of coefficients and predicted values of linear regression, Measuring Technology and Metrology, No. 69, Lviv, 2008.

Received 02.06.2025.  
Accepted 09.06.2025.

### ***Non-parametric statistics of random variables with unknown probability distribution functions***

*The paper is devoted to the actual problem of data analysis with unknown distributions, where classical parametric methods are ineffective. On the example of two types of distributions (logistic (symmetric) and exponential (asymmetric)), the application of a nonparametric approach, which consists of the stages of ranking and analysis of extreme values, is shown. Purpose: to conduct a qualitative analysis of the statistical homogeneity of time series by evaluating the main special criteria of samples - shifts and scales, to identify the advantages of such approaches for determining or further verifying the statistical homogeneity of time series samples. Research methods: The paper uses basic methods of nonparametric statistics: nonparametric criteria for statistical homogeneity are applied to simulation models of samples. For samples with logistic and exponential distribution laws, their statistical parameters were found and analyzed and tested for statistical homogeneity. Practical novelty of the study: the approach to testing for statistical homogeneity presented in the paper expands the practical scope of applying nonparametric statistics methods for complex statistical analysis of time series with a distribution law other than normal. Applications: the results of the study can be used in areas requiring the analysis of statistical homogeneity of data, in particular in engineering to monitor the condition of technical objects and systems, in sociological research to identify significant differences between groups, in the medical field to control the quality of laboratory measurements.*

*Keywords: nonparametric statistics, statistical homogeneity, distribution of random variables, ranking, averages, shifts, scales, computer modeling.*

**Федоренко Олексій Денисович** - аспірант кафедри кібербезпеки і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**Клим Вікторія Юріївна** - кандидат технічних наук, доцент кібербезпеки та інформаційних технологій, кафедра кібербезпеки і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**Клименко Світлана Володимирівна** - завідувач кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**Fedorenko Oleksii Denysovych** - Postgraduate Student, Department of Cybersecurity and Computer-Integrated Technologies, Oles Honchar Dnipro National University

**Klym Viktoriia Yuriiivna** - PhD in Engineering, Associate Professor of Cybersecurity and Information Technologies, Department of Cybersecurity and Computer-Integrated Technologies, Oles Honchar Dnipro National University

**Klymenko Svitlana Volodymyrivna** - Head of the Department of Cybersecurity and Computer-Integrated Technologies, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Computer-Integrated Technologies, Oles Honchar Dnipro National University

## ADAPTATION OF A PREDICATE MODEL IN CONTROL PROBLEMS OF NONSTATIONARY STATIC OBJECTS

*Abstract.* When controlling static objects at the optimization level, pattern recognition methods are used that allow partitioning the factor space into elementary subdomains in the form of  $n$ -dimensional hyperparallelepipeds. One of the main elements of the control structure for this approach to control is the adaptation algorithm, that makes it possible to refine the description of a static object under nonstationarity conditions. Repeated use of the adaptation algorithm to refine the model leads to an unjustified complication of its logical structure and the accumulation of information that has lost its relevance. The paper proposes a method for minimizing the description of images of technological situations, that makes it possible to overcome the indicated disadvantages. The method is based on the property of invariance of the number of parameters defining the hyperparallelepiped to the size of the described area in the factor space. This made it possible to identify significant boundary sub-areas in the description of the image of technological situations and, by their subsequent combination in the direction of the feature axes, to select a description with a minimum number of sub-areas. When performing these operations, “outdated” information is removed and the logical structure of a static control object is simplified as much as possible. The paper shows the possibility of implementing an algorithm for minimizing the description of images on the basis of  $\alpha$ -algebra, that makes it possible to integrate its control structures using relational data models. The effectiveness of the proposed algorithm is confirmed by computational experiments in the control of the process of lump crushing for the conditions of a mining and processing plant.  
*Keywords:* controlling static objects,  $\alpha$ -algebra, method for minimizing the description of images, information, adaptation algorithm

**Introduction.** Adaptive control systems capable of functioning effectively in unstable environments remain an important area of modern scientific research. In particular, predicate models — logical knowledge representation models based on predicates (mathematical logic formulas) — and their adaptation for solving control tasks of technical objects are being actively studied [1]. Predicate models make it possible to describe the states and interrelations of an object in the form of logical statements (predicates), which ensures flexible decision-making based on knowledge. However, for their effective application in real-time systems, such models require mechanisms for adaptation to changing operating conditions of the controlled object.

Ukrainian researchers have made a significant contribution to the development of this area. Thus, the authors in [2] proposed a predicate model for selecting protection devices for asynchronous motors operating under unstable power supply conditions. It has been shown that the energy-economic model of the motor can be represented as a disjunction of predicates, and pattern recognition algorithms can be applied to this model for decision-making regarding motor protection. An important advantage of this approach is the openness of the model and the possibility of accumulating knowledge about the equipment [3]. Based on the classical algorithm of statistical optimization of nonlinear objects represented by a set of predicates, the authors in [2, 3] achieved an effective search for solutions according to the principle of local gain. Further research by these authors was aimed at accelerating the development of predicate models and ensuring their structural adaptation. In particular, methods for reducing the description of features made it possible to build a model faster at the training stage and subsequently perform the necessary structural transformations during adaptation while maintaining the accuracy of describing the interrelations [4, 5]. This made it possible to take into account the technical and economic performance indicators of the equipment under various conditions (with or without protection devices) and to ensure the optimal choice of a solution [2-5].

In addition to recent works, it is worth noting earlier studies that laid the foundation for the development of adaptive predicate models. The author in [6] proposed a method of adapting the description of patterns in the algorithm of recognizing production situations as early as 1984. The author in [7] in 1982 developed a method for describing technological situations for process control using state predicates, optimizing the description by reducing redundant information. These studies [6,7] demonstrated the possibility of encoding the states of technological objects in the form of numerical predicates and their use in control systems. These fundamental studies, although conducted several decades ago, remain relevant as examples of knowledge formalization about the control object and their gradual refinement (adaptation) during operation.

In parallel with Ukrainian research, approaches to adaptive control based on logical models are also actively developing in the global scientific community. For example, the authors in [8] compared the capabilities of classical predicate logic, fuzzy logic, and non-monotonic logic as methods of knowledge representation for control systems. They demonstrated that each approach has its strengths: predicate logic ensures strictness and unambiguity of conclusions; fuzzy logic provides flexibility in conditions of uncertainty; and non-monotonic logic enables the revision of previously made conclusions when new information becomes available. Modern studies often combine these approaches to achieve greater adaptability of control systems.

Scientific literature emphasizes that effective control of non-stationary objects requires the use of models capable of being updated in real-time and of taking into account changes in system parameters during operation. Such models reflect both the current state of the object and the rules of response to changes (for example, exceeding parameter thresholds).

Once a sufficient amount of reliable and accurate information about the main disturbing factors and external influences affecting the technological object is collected, it becomes pos-

sible to significantly improve the quality of control over such systems. In particular, the availability of detailed data on the characteristics and behavior of the controlled object under varying operating conditions allows for the development and implementation of highly effective control strategies. These strategies are aimed at ensuring stable operation of the object, minimizing negative effects from disturbances, and maintaining optimal performance indicators.

In order to achieve such a high level of control, it is necessary to determine optimal control actions that are adequate to the current operational state of the object and the nature of the influencing disturbances. The formation of these optimal control actions can be carried out in different ways, depending on the peculiarities of the technological process and the available computational resources.

One of the possible approaches is to establish the dependence of the control actions on the changing disturbances directly in the course of the control process. In this case, optimal solutions are determined in real time using optimization algorithms based on the current values of disturbances and object parameters. However, this approach often requires considerable computational resources and time, especially when the system is complex or when the object is influenced by a large number of rapidly changing factors. Moreover, the resulting dependence of optimal control actions on disturbances usually cannot be expressed explicitly in a simple analytical form due to the complexity of the object's behavior.

Alternatively, the dependence of control actions on disturbing factors can be formed in advance, during the design or configuration phase of the control system, based on a mathematical model of the object obtained from previous studies or experimental data. In this case, the optimization calculations are carried out beforehand for different scenarios of possible disturbances, and the results are stored in the form of precomputed functions, lookup tables, or control charts. These stored solutions are then used during the operation of the system for quick selection of control actions without the need for repeated optimization computations.

Both of these approaches are conceptually similar, as they are based on the idea of optimizing control actions in accordance with the characteristics of the object and the nature of the disturbances. However, they differ primarily in the frequency and timing of optimization calculations. In the first approach, the calculations are performed continuously or at the rate at which the disturbances change, ensuring an adaptive response of the control system to real-time changes. In the second approach, all necessary computations are performed offline, prior to the control process, and the system uses the prepared data during its operation.

Regardless of the chosen approach, in both cases the task of determining optimal control actions is solved using well-known mathematical programming methods. These include various techniques of linear, nonlinear, and dynamic optimization, which are widely used in control theory for static or quasi-static objects [9, 10]. These methods allow for formalizing the control problem, taking into account existing constraints and optimization criteria, and finding the most effective control actions that ensure stable and efficient functioning of technological objects under variable external conditions.

Static optimization methods are widely recognized as an effective tool for solving a broad spectrum of practical problems in the field of control of technological processes and

technical systems. These methods make it possible to determine optimal operating modes, resource allocation, or control strategies under given conditions and system constraints. The choice of a particular optimization method, as indicated in [11], is largely determined by the availability of a well-defined mathematical description of the process or object to be controlled.

Indeed, the presence of a reliable and sufficiently accurate mathematical model of the object is a key prerequisite for the successful application of most static optimization techniques. Such a model serves as the basis for formulating the optimization problem, setting the objective function, and defining the system constraints.

However, in many real-world cases, obtaining a mathematical model of a complex technological object is associated with significant challenges. This is especially true for industrial processes characterized by high variability, nonlinearity, or the influence of many uncontrolled factors. A typical example of this is the process of lump crushing at ore-dressing and processing plants, where the dynamics of the process are determined by a large number of random and difficult-to-measure parameters.

The development of a mathematical model for such objects using traditional approaches - such as experimental research, statistical data analysis, or physical modeling — requires considerable financial investment, as well as substantial time and human resources. These costs may become even more substantial when considering the fact that in real operating conditions, the parameters and characteristics of the process often change over time due to wear of equipment, changes in raw material properties, or varying external influences.

Consequently, it is necessary not only to develop the initial mathematical model but also to regularly update or refine the model coefficients to maintain its relevance and accuracy. This model adjustment is essential to ensure the correctness of the optimization results and the effectiveness of control decisions. However, periodic model identification or recalibration requires additional measurements, data collection, and computational resources, which further increases the overall economic and labor costs associated with the modeling and optimization process.

Therefore, when selecting optimization methods for practical application, it is very important to take into account not only the accuracy requirements for the mathematical description of the process but also the cost-effectiveness of obtaining and maintaining such a model. In some cases, it may be reasonable to use simplified models, heuristic methods, or knowledge-based approaches that require less detailed information about the object but still provide acceptable quality of optimization and control solutions.

One of the possible and widely recognized approaches to overcoming the aforementioned difficulties associated with obtaining mathematical models of complex technological processes is the use of adaptive identification methods. These methods are designed to automatically adjust the parameters of the model during the operation of the control system based on real-time measurement data. This approach makes it possible to significantly reduce the cost and time associated with traditional offline modeling procedures, especially in cases where the system operates under conditions of uncertainty or frequent changes in its parameters.

Among the existing adaptive identification methods, the most commonly used is the least squares method, which has proven to be highly effective in many engineering applications. This method provides parameter estimation by minimizing the sum of squared deviations between the measured output data of the system and the corresponding values calculated from the model. Its widespread popularity is explained by its relatively simple mathematical implementation, stability of results, and the possibility of its application in both static and dynamic systems.

In addition to the least squares method, various modifications of the stochastic approximation method are also used quite successfully for solving identification tasks, especially in situations where the measurement data are subject to significant noise or when the system parameters vary in a random manner [12]. These methods allow for a gradual refinement of parameter estimates through iterative procedures based on incoming measurement data, which ensures the adaptability of the model to changing external and internal conditions of the technological object.

However, despite the obvious advantages and the wide range of proposed methods for adaptive identification, it should be noted that the practical application of this approach is not without significant limitations and challenges. One of the main problems is that, although the theory of identification provides a large variety of mathematical tools, algorithms, and procedures for parameter estimation, it does not offer clear recommendations regarding the rational choice of the model structure itself or the optimal identification criteria.

In other words, the main focus of identification theory is on the mathematical aspects of parameter estimation within an already defined model structure, while the issue of selecting the appropriate structure of the model — that is, the set of variables, their interrelationships, and the form of the model equations — often remains outside the scope of this theory. Additionally, there is a lack of universally accepted criteria for evaluating the quality of identification results and for choosing the most suitable identification algorithms for a specific object or control task.

As a result, as noted by experts in this field [13], the process of selecting appropriate adjustable models and corresponding algorithms for their identification is often based not only on strict scientific principles but also on the experience, intuition, and creative approach of the developer or system designer. Therefore, it is quite fair to state that “the choice of tunable models and algorithms is more an art than a science” [13], reflecting the fact that successful implementation of adaptive identification methods in practice requires not only theoretical knowledge but also a deep understanding of the specific features of the controlled object, the nature of the disturbances, and the requirements of the control system.

In addition, the model of an object in analytical form has a significant drawback: the invariability of its structure. The constancy of the structure of the mathematical model leads to a loss of accuracy in describing a real process. Pattern recognition methods have much greater flexibility in terms of improving the model, that is, clarifying its structure.

Recognition methods are widely used in process control. They are mainly used for predicting its course, that is, predicting the parameters characterizing the process, or assigning

the expected mode to one of the predetermined classes - typical modes. It is obvious that optimization methods and recognition methods complement each other, and only their combined application can improve the efficiency of technological processes control.

In [14, 15], this approach is applied to the choice of technical means of protection of an induction motor in electrical networks with low-quality electricity. At the same time, a predicate adaptive model of the following type was chosen as a mathematical model reflecting the regularities of the influence of the indicators of the electrical network and the cost indicators of protective equipment on the economic efficiency of operating an induction motor:

$$Z_e[\vec{X}, \vec{U}] = \bigvee_{p=1}^q \left\{ \left[ \bigvee_{l=1}^{\lambda_p + s_1} Z_{pl}[\vec{X}, \vec{U}] \right] \wedge \left[ \bigvee_{h=1}^{s_2} Z_{ph}[\vec{X}, \vec{U}] \right] \right\}$$

where  $\vec{X}, \vec{U}$  – are the vectors of power quality indicators and cost indicators of protective equipment, respectively;  $s_1$  and  $s_2$  – the number of results obtained for the recognition of contradictions of the first and second kind, respectively;  $q$  – the number of images of economic situations;  $\lambda_p$  – the number of predicates describing  $l$  - the pattern at the end of the pattern recognition learning procedure;  $\vee, \wedge$  – logical operations of disjunction and conjunction, respectively.

Model (1) can also be applied to optimize static technological processes, if vectors of perturbing and control quantities are considered as vectors  $\vec{X}$  and  $\vec{U}$ . However, continuous refinement of this model will inevitably lead to an increase in conjunction and disjunction operations in its right-hand side and, as a consequence, a complication of the structure and the need to adjust the algorithm for choosing the optimal control actions. This circumstance limits the application of the considered approach to the control of technological processes with constant parameters.

*Purpose of paper.* This paper is aimed at substantiating the possibility and determining the stages of identical transformations of the predicate model in order to prevent the complication of its structure.

**The main material.** The optimal control of static and case-static modes of robots of technological objects is based on the pattern recognition method, which allows partitioning the factor space into elementary subdomains. The essence of the algorithm for recognizing static optimization of nonlinear objects is as follows.

In the process of learning recognition by elements of the sample population  $(\vec{X}_1, \dots, \vec{X}_u)$ , it is necessary, by setting different values of the control criterion  $y$  in the interval  $y_{\max} \div y_{\min}$ , to split the factor space  $\{x_1, \dots, x_n\}$  into two images:  $M_1$ , if  $y_j \leq y$  and  $M_2$ , if  $y_j > y$  ( $j = \overline{1, v}$ ), where  $v$  – sample size. If, in this case, the value of the control criterion is changed with the interval  $\Delta y$ , then  $m = \text{entier}((y_{\max} - y_{\min}) / \Delta y) + 1$  of the separating images of hypersurfaces will be obtained, which, in accordance with the method of analytical description of objects by methods that allow partitioning the factor space into ele-

mentary regions, can be specified in the form of predicate equations  $Z_i$ . If a controlled value can be selected as a quality, then  $\Delta y$  is the accuracy of its control.

A significant advantage of constructing a mathematical model of a complex and heterogeneous technological process within a unified mathematical framework is that such a model inherently incorporates the basic constraints and limitations imposed by the physical nature and operating conditions of the process itself. These built-in constraints reflect the fundamental technological requirements, safety regulations, operational limits, and resource restrictions that must be respected during the control of the object.

When the technological process is adequately described within a single modeling approach — for example, using unified mathematical equations or a generalized set of dynamic relationships — it becomes possible to significantly simplify the development of the control system. This is because the restrictions that normally require separate consideration in optimization problems are already implicitly present in the mathematical representation of the process.

As a result, there is no need to formulate an additional system of external constraints or perform complex analytical transformations to account for them during optimization. The constraints are naturally integrated into the model structure through the interconnections between variables, technological balances, and functional relationships governing the process behavior.

This modeling feature provides a unique opportunity to design control algorithms that do not require the application of conventional, often resource-intensive, optimization methods. Instead of resorting to classical optimization procedures — such as linear programming, nonlinear programming, or multi-criteria optimization — the control problem can be solved using relatively simple computational procedures based on the existing model.

In such cases, the optimal control actions are generated directly within the control algorithm as a result of the model's structure and its inherent properties. The system automatically respects all process limitations without the need for additional computational steps for constraint handling.

Thus, the use of a unified mathematical model for describing heterogeneous technological processes allows for the implementation of straightforward and computationally efficient control algorithms. These algorithms ensure optimal or near-optimal control performance while significantly reducing the complexity of the control system and minimizing the computational burden compared to traditional optimization-based control approaches.

This modeling strategy is especially relevant in real-time control tasks or in systems with limited computational resources, where the simplicity and speed of the control algorithm are critical factors for its practical implementation.

Of the factors influencing the process, controllers  $x_1 \div x_v$  are distinguished and the full range of their changes is presented as a series of values with an interval  $\Delta x$ . Thus, all possible controls can be specified as combinations of these values. Then, based on the values of the disturbing factors  $x_{v+1} \div x_n$ , it is sufficient to determine the truth of the predicate  $Z_1$  for all

possible controls. The optimal control is the one that ensures the truth of the predicate. If the optimal combination is not found by the predicate  $Z_1$ , then it is necessary to expand the investigated zone of the factor space by passing to the predicate  $Z_2$ , etc.

When constructing mathematical models of complex systems or when solving control and optimization problems, it is often necessary to partition the n-dimensional factor space into simpler geometric regions for the purpose of analysis, classification, or decision-making. In this context, one of the most convenient and widely used geometric objects for representing an elementary domain in an n-dimensional factor space is the hyperparallelepiped.

A hyperparallelepiped is a generalized geometric figure in multidimensional space, which is a direct extension of a parallelepiped in three-dimensional space to higher dimensions. Its structure is defined by specifying the lower and upper boundaries along each of the n coordinate axes corresponding to the factors or variables under consideration.

Mathematically, such an elementary domain can be very conveniently and compactly described using a two-valued logical predicate function, which allows one to determine whether a given point in the factor space belongs to this region or not. In other words, the hyperparallelepiped is defined as a set of all points whose coordinates satisfy a system of inequality constraints that specify the minimum and maximum permissible values for each factor.

This two-valued predicate takes the value "true" (or 1) if the point lies within the specified limits along all coordinate axes, and "false" (or 0) if at least one of the constraints is violated. Such a representation is not only mathematically rigorous and unambiguous but also very convenient for practical implementation in algorithms of control, identification, classification, or optimization.

Moreover, using a hyperparallelepiped as an elementary domain in the factor space offers a number of advantages from the computational point of view. The simplicity of the mathematical expression that defines its boundaries allows for fast checking of point membership, which is critical in real-time control systems or in optimization algorithms where a large number of such checks may be required.

In summary, the hyperparallelepiped provides a universal and efficient geometric structure for partitioning the factor space in multidimensional modeling tasks. Its formal description through a two-valued logical predicate ensures clarity, ease of implementation, and high computational efficiency, making it one of the most suitable elementary domains for use in control theory, decision-making systems, pattern recognition, and various engineering applications:

$$Z[\vec{X}] = \frac{1}{2^n} \prod_{j=1}^n \{1 + \text{sgn}[(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)]\}$$

where

$$\text{sgn}[(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] = \begin{cases} 1, & \text{if } [(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] \geq 0 \\ -1, & \text{if } [(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] < 0 \end{cases}$$

$X_{j_{\min}}, X_{j_{\max}} (j = \overline{1, n})$  – parameters of an elementary hyperparallelepiped that determine its dimensions;  $n$  – the number of input quantities (disturbing and controlling);  $x_j$  – current values of input quantities;  $\prod$  – mathematical multiplication operation.

If the current technological situation  $\vec{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  falls inside the hyperparallelepiped (the technological situation is recognized), then  $Z[\vec{X}] = 1$ , otherwise  $Z[\vec{X}] = 0$  (the technological situation is not recognized).

Then the whole p - image can be represented as a logical sum of predicates:

$$Z_p[\vec{X}] = \bigcup_{l=1}^{\lambda_p} Z_l[\vec{X}]$$

where  $\lambda_p$  – the number of predicates that determine the p - image.

The set of n - dimensional hyperparallelepipeds that define the p - image in the feature space have a random arrangement - they may intersect or have no common points at all.

The mathematical model of the controlled object, presented in the form of m - images, will take the form:

$$Z_m[\vec{X}] = \bigcup_{p=1}^m Z_p[\vec{X}]$$

In the process of control, it is possible to refine the model (5). So if for the current technological situation the optimal control values have not been found (error of the first kind), then predicate (2) is formed based on the control result with the current control values and is included in (4). If, for the current situation, the optimal control values are determined, but the control result does not correspond to the expected (error of the second kind), then the corresponding predicate in (4) is further considered false and a new alternative image is formed, and the mathematical model takes the form (1). A simple removal of the false predicate from (4) is impossible, since it defines a set of technological situations that fall inside some n-dimensional hyperparallelepiped.

Obviously, when controlling a non-stationary static or quasi-static object, such refinements can be performed many times, which will lead to a structural complication of the mathematical model (1) and, as a consequence, to the loss of the control algorithm performance. Structural changes (1) should be limited.

It is proposed to solve the problem of limiting structural changes in the predicate model of technological situations on the basis of the invariance of the number of parameters of the hyperparallelepiped to the size (volume) of the region specified by it in the feature space. A set of randomly located p-image hyperparallelepipeds can be represented as ordered hyperparallelepipeds differing in size (Fig. 1). The hyperparallelepipeds located on the border of the image will have the smallest dimensions, since they determine the accuracy of the dividing function. In Fig. 1 they are shaded.

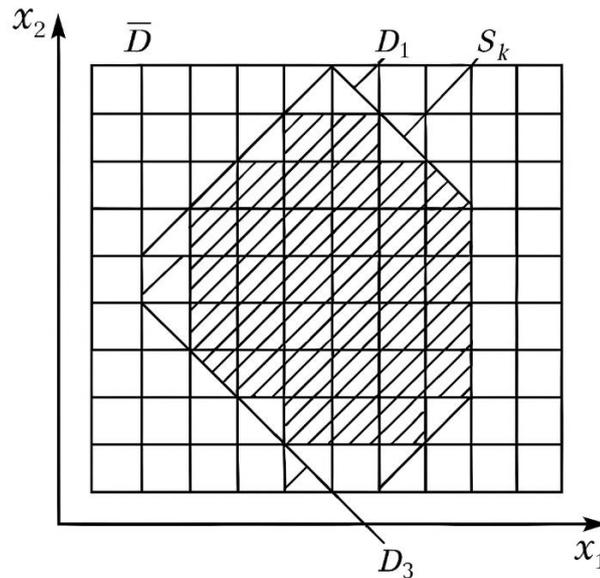


Figure 1 - Location of Boundary Subareas

If we combine the shaded boundary sub-areas in the direction of one of the feature axes, for example,  $x_1$ , we get different-sized sub-areas that completely describe the image. Thus, the union of the subdomains  $D_1$  and  $D_2$  is of interest, since the resulting subdomain  $D_{12}$  includes, in addition to  $D_1$  and  $D_2$ , one more internal subdomain of the image  $S_k$ . Combining the  $D_1$  and  $D_3$  subdomains into the  $D_{13}$  subdomain will allow simultaneously describing four more internal subdomains.

It is easy to see that the combined subregions differ only in the parameters of one projection. This allows us to propose a simple condition according to which two boundary subdomains are to be united if all internal subdomains located between them belong to the image  $x_{j\min}^1 = x_{j\min}^2; x_{j\max}^1 = x_{j\max}^2$  under  $j = \overline{1, n}; j \neq r$ , where  $x_{j\min}^1, x_{j\min}^2, x_{j\max}^1, x_{j\max}^2$  – parameters of function (2) describing two combined subdomains;  $r$  is the number of the feature axis in the direction of which the union is performed. For the resulting subdomain, the unknown minimum and maximum value of the  $m$ -feature is defined as  $x_{m\min}^{12} = \min \{ x_{m\min}^1, x_{m\min}^2 \}; x_{m\max}^{12} = \max \{ x_{m\max}^1, x_{m\max}^2 \}$ .

Obviously, the considered unification of the boundary subareas does not lead to a change in the location of the image in the feature space, since the boundary areas do not change their location - they are only united by oppositely located boundary subareas. This transformation of the image is identical. It can be performed immediately upon the occurrence of the previously mentioned contradiction of the second kind. Then the complication of the structure of model (5) is not required.

It should be noted that the number of enlarged subregions obtained as a result of merging is already more than two times less than the number of boundary subregions. These joins can be continued in the remaining  $n - 1$  directions. If you change the sequence of combining along the attribute axes, you can get  $n!$ , separating functions, from which the minimum in terms of the number of constituent subdomains is selected.

**Practical implementation of the minimization algorithm.** The set of technological situations given by predicates (2) are combined into classes depending on the values of the control criterion. Each class is determined by the disjunction of predicates. The use of such a model involves arranging its elements in the form of a two-dimensional table. And in its columns values  $X_{j_{\min}}^{pl}, X_{j_{\max}}^{pl}$  are placed, and the line corresponds to some predicate.

It is easy to see that the columns of the table have different names and are homogeneous, all rows are unique and have the same structure. The order of the lines is not significant and only affects the speed of access to each of them. Given also that the information in the columns is atomic, we can conclude that this table satisfies the conditions and constraints that allow us to consider its relationship as a relational data model [16-18]. The sequence number of the relation tuple (table row) uniquely identifies the current technological situation. The set of attributes (columns of the table) determines the scheme of the relationship. It is clear that the set of relations  $M_k$ , each of which describes a certain class of technological situations, completely determine the model of the technological process. Here  $k = \overline{1, q}$ , where  $q$  is the number of relationships.

Operations on relations are determined by  $\alpha$ -algebra. Consider the application of  $\alpha$ -algebra to implement the procedures of the proposed minimization algorithm.

Algorithms for minimization and accelerated learning are based on combining two subregions  $D_1$  and  $D_2$  in factor space (Fig. 2).

The tuples of relations that define these subdomains differ in the value of the two attributes  $x_{l_{\min}}, x_{l_{\max}}$  ( $x_1$  is the sign axis in the direction of which the union takes place. Selection of these tuples  $D_1$  and  $D_2$  is achieved by the filtering operation. To obtain a tuple  $D_{12}$  that defines the combined region  $D_{12}$ , the relation  $D_1$  is first decomposed into the relation  $D_{1MX}$  without the attribute  $x_{l_{\min}}$  and the relation  $D_{1MN}$  without the attribute  $x_{l_{\max}}$ , and the relation  $D_2$  into the relation  $D_{2MN}$  with a single attribute  $x_{l_{\min}}$  and the relation  $D_{2MX}$  with a single attribute  $x_{l_{\max}}$ .

This decomposition is achieved by the projection operation. In the future, performing the Cartesian multiplication operation  $D_{1MX} \otimes D_{2MN}$  and  $D_{1MN} \otimes D_{2MX}$ , two tuples of the relation  $D_{12}$  with a complete set of attributes are formed, from which the desired  $D_{12}$  is selected by filtering under the condition  $x_{l_{\min}} < x_{l_{\max}}$ .

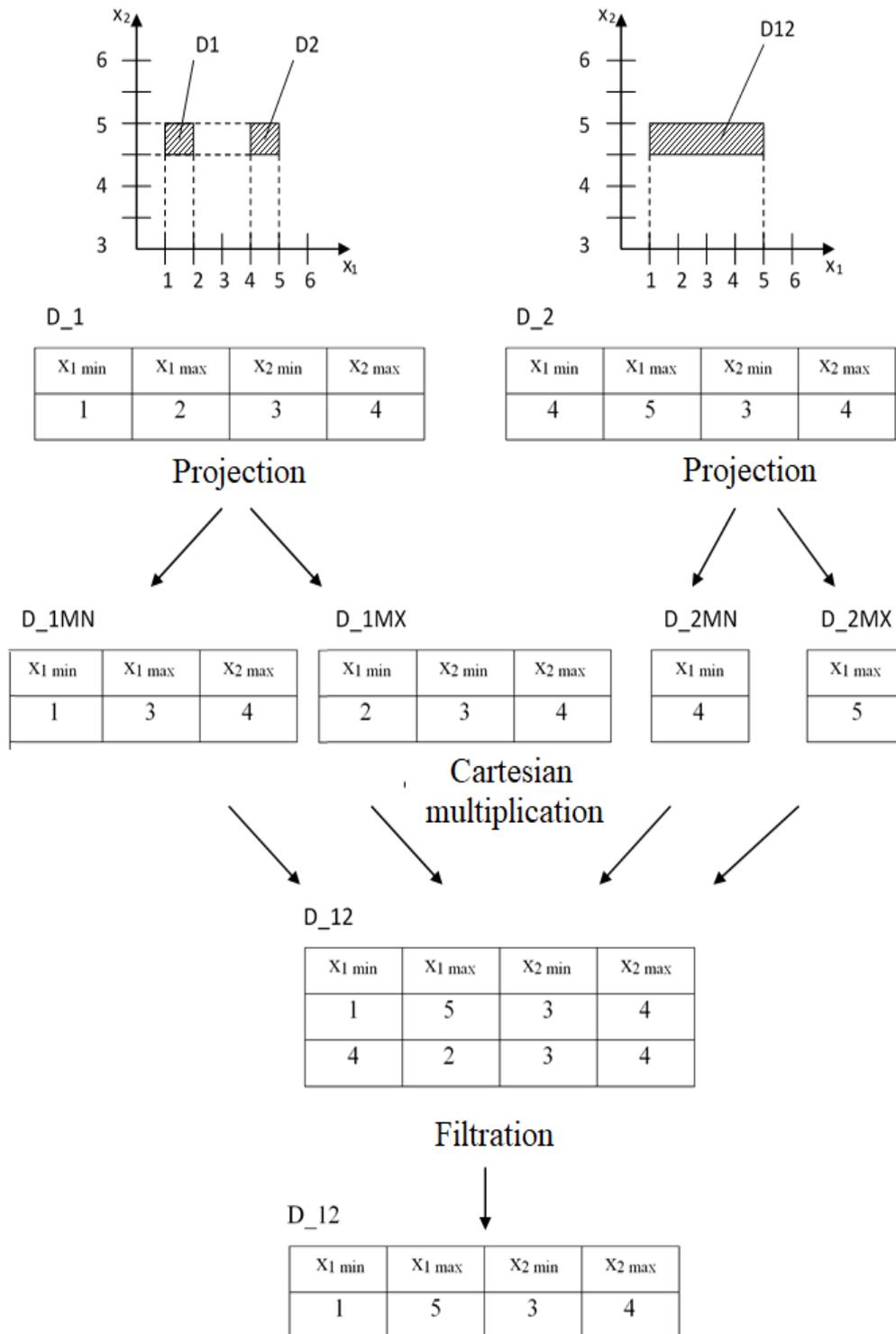


Figure 2 - Defining a tuple that defines a merged area

### Conclusions.

1. The proposed minimization algorithm provides a robust mechanism for stabilizing the structure of the predicate model, which is particularly important when dealing with non-linear and nonstationary objects. By systematically reducing the uncertainty and variability inherent in such systems, the algorithm ensures the consistency and adaptability of the model structure over time. This, in turn, allows the refined predicate model to be effectively utilized

for solving optimal control problems, enabling improved decision-making, better system responsiveness, and enhanced performance in dynamic and complex environments.

2. Identical transformations applied to the predicate model, which are grounded in the principle of invariance of the number of predicate parameters with respect to the size of the region in the  $n$ -dimensional factor space that the model characterizes, enable a significant simplification of the model structure. This invariance implies that the complexity of the model does not necessarily have to grow with the expansion of the factor space, allowing for a more efficient representation of the system's behavior. As a result, it becomes possible to systematically reduce the number of predicates without losing the descriptive power or accuracy of the model. Such a reduction contributes to improved computational efficiency, enhances interpretability, and facilitates the application of the model to real-time or large-scale control and decision-making tasks in dynamic environments.

3. Representation of elements of the predicate model in the form of a relational data model allows to describe the minimization procedure on the basis of a single mathematical apparatus of  $\alpha$ -algebra. Given that relational data models are supported by database management systems, the proposed algorithm can be easily integrated into the information and software structures of existing management systems.

#### REFERENCES

1. Temnikova, O. L. *Mathematical Logic and Theory of Algorithms: Lecture Notes* [Electronic resource]: a textbook for students of the specialty 113 "Applied Mathematics", educational program "Data Science and Mathematical Modeling" / O. L. Temnikova; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. – Electronic text data (1 file: 3.60 MB). – Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2021. – 177 p.
2. Tryputen, N., Nikolenko, A., Voskoboynik, Y., Kuznetsov, V., Kuznetsova, Y., & Tryputen, M. (2018). *Predicate model in the task of optimal selection of protection means for an asynchronous motor*. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, (16). Pp. 70-75. <https://doi.org/10.15802/ecsrt2018/172650>
3. Kuznetsov V., Tryputen M., Kuznetsov V., Tryputen M., Kuznetsova A., and Kuznetsova Y. *Choosing of Asynchronous Motor Protection Equipment in Production Environment* IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 985 (2020) 012022 doi:10.1088/1757-899X/985/1/012022
4. Tryputen M., Kuznetsov V., Kovzel M., Kovalenko V., Artemchuk V., Nadtochy V. *Minimization of the Description of Images in the Problem of Adaptive Control of Static Technological Objects* (2021) *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021*. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598651
5. Tryputen M., Kuznetsov V., Kuznetsova A., Tryputen M., Kuznetsova Y., Serdiuk T. *Improving the Reliability of Simulating the Operation of an Induction Motor in Solving the Technical and Economic Problem* (2021) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1247 AISC, pp. 143 – 152. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_13
6. Kachan, Y. G. (1984). *Adaptation of the image in the algorithm for recognizing industrial situations*. *Mechanization and Automation of Control*, (1), 15–17.

7. Voronov, V. A. (1982). Method for describing technological situations and its application in process control. *Ore Beneficiation*, (2), 31–35.
8. Yang K.H., Olson D., Kim J. Comparison of first order predicate logic, fuzzy logic and non-monotonic logic as knowledge representation methodology (2004) *Expert Systems with Applications*, 27 (4), pp. 501 - 519, DOI: 10.1016/j.eswa.2004.05.012
9. Zangwill, Willard I. *Nonlinear programming; a unified approach* (1969) Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 356 p.
10. Polak, E. *Computational Methods in Optimization* (1971), Academic Press, New York-London, 329 p.
11. Himmelblau, David Mautner *Applied Nonlinear Programming* (1972), New York, 498 p.
12. Tsytkin, Ya Z. *Adaptation and Learning in Automatic Systems* (1971), Academic Press, New York / London, 399 p.
13. Tsytkin, Ya Z. *Information theory of identification* (1995), Moscow, Science, 336 p.
14. Kuznetsov, V.V., Tryputen, M.M., Kuznetsov, V.G., Tryputen, M., Kuznetsova, A., Kuznetsova, Y. Choosing of asynchronous motor protection equipment in production environment (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985 (1), DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012022
15. Tryputen, M., Kuznetsov, V., Kuznetsova, A., Tryputen, M., Kuznetsova, Y., Serdiuk, T. Improving the Reliability of Simulating the Operation of an Induction Motor in Solving the Technical and Economic Problem (2021) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1247 AISC, pp. 143-152. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_13
16. Wei, Q., Duan, G., Cai J. and Zhou, G. Mapping Technique of STEP Data Model in Relational Database Based on Data Storage, *2009 Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 2009, pp. 657-660, doi: 10.1109/ICINIS.2009.170.
17. Al-Kandari, A. and Alhouli, M. Fuzzy Object Relational Database Management System (FORDBMS) is appropriate approach for Real-Estate (GIS) business, *2014 Fourth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP)*, 2014, pp. 114-117, doi: 10.1109/DICTAP.2014.6821667.
18. Suna Yin, Dehua Chen, Jiajin Le, "STNoSQL: Creating NoSQL database on the SensibleThings platform", *Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD) 2016 17th IEEE/ACIS International Conference on*, pp. 669-674, 2016.

Received 02.06.2025.  
Accepted 09.06.2025.

### ***Адаптація предикатної моделі в задачах керування нестационарними статичними об'єктами***

*У даній роботі розглянуто актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності управління статичними та квазістатичними технологічними об'єктами в умовах їх нестационарної поведінки та мінливості зовнішніх впливів. Особлива увага приділяється застосуванню предикатних моделей, які дозволяють формалізовано описувати різноманітні технологічні ситуації, стани та взаємозв'язки параметрів об'єкта управління за допомогою логічних конструкцій. Такі моделі є гнучким інстру-*

ментом для представлення знань про об'єкт і забезпечують можливість адаптації до зміни параметрів у процесі експлуатації.

Запропоновано новий підхід до побудови та адаптації предикатної моделі на основі алгоритму мінімізації опису образів технологічних ситуацій. Його сутність полягає у виявленні та видаленні з моделі інформації, що втратила актуальність, а також у спрощенні логічної структури моделі без втрати якості її опису. Важливою особливістю даного підходу є використання властивості інваріантності кількості параметрів, що визначають гіперпаралелепіпед у факторному просторі незалежно від його розмірів. Це дозволяє суттєво зменшити кількість предикатів у моделі та знизити складність обчислювальних процедур у системах автоматизованого управління.

Методика побудови моделі передбачає розбиття факторного простору на елементарні підобласті - гіперпаралелепіпеди, які дозволяють гнучко формувати опис різних ситуацій. При цьому граничні підобласті, що мають найменші розміри, визначають точність роздільної функції. Об'єднання таких підобластей у напрямку осей ознак дозволяє оптимізувати структуру моделі та спростити процес прийняття рішень в системах управління.

Особливу увагу в роботі приділено можливості практичної реалізації алгоритму мінімізації на основі апарату  $\alpha$ -алгебри. Це забезпечує інтеграцію моделі до інформаційних систем на основі реляційних моделей даних, які підтримуються сучасними системами управління базами даних. Такий підхід дозволяє підвищити універсальність та зручність використання запропонованого методу у складі існуючих автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Показано, що використання моделі з мінімізованим описом дозволяє забезпечити високу якість управлінських рішень, адаптивність до зміни характеристик процесу та стабільність функціонування системи в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх факторів невизначеності.

Таким чином, представлений у роботі підхід до побудови предикатної моделі та її адаптації шляхом мінімізації опису образів технологічних ситуацій є універсальним інструментом для управління нестационарними статичними об'єктами. Запропонований алгоритм може бути використаний для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, автоматизованих систем оптимального управління, а також інформаційно-аналітичних систем промислових підприємств.

Ключові слова: управління статичними об'єктами, предикатна модель,  $\alpha$ -алгебра, мінімізація опису образів, адаптація моделі, інформація, нестационарні технологічні процеси, реляційна модель даних, автоматизовані системи управління.

**Tryputen Mykola** - candidate of technical sciences, associate professor Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine. e-mail: [nikolaytriputen@gmail.com](mailto:nikolaytriputen@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

**Kuznetsov Vitalii** - candidate of technical sciences, associate professor Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine e-mail: [wit-jane20002014@gmail.com](mailto:wit-jane20002014@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8169-4598

**Yvanova Lyudmyla** - doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, Ukrainian state university of science and technologies.

**Трипутень Микола** – кандидат технічних наук, доцент Дніпровський технологічний університет, Дніпро, Україна. e-mail: [nikolaytriputen@gmail.com](mailto:nikolaytriputen@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

**Кузнецов Віталій** – кандидат технічних наук, доцент Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна e-mail: [wit-jane20002014@gmail.com](mailto:wit-jane20002014@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8169-4598

**Іванова Людмила Харитонівна** - доктор технічних наук, професор, Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій.

## ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКРУГОВИХ КОНУСІВ ПРИ НАДЗВУКОВОМУ ОБТІКАННІ

*Анотація.* В роботі розглянуто задачу про надзвукове обтікання гострого конуса з довільним гладким поперечним перерізом потоком в'язкого газу. Припускалось, що вплив в'язкості зосереджено в тонкому шарі поблизу твердої поверхні і всю область течії можна розділити на нев'язкий потік і примежовий шар. Для розв'язання задачі в області нев'язкої течії застосовувався стаціонарний аналог метода Годунова, в примежовому шарі – скінченно-різницевий метод Петухова. Проведено чисельний аналіз аеродинамічних характеристик біеліптичного конуса. Показано, що число Рейнольдса і форма поперечного перерізу суттєво впливає на величину аеродинамічних коефіцієнтів конуса.

*Ключові слова:* надзвукове обтікання, коефіцієнт опору, підйомна сила, конус, поперечний переріз, рівняння Ейлера, примежовий шар.

**Постановка проблеми.** Однією з важливих задач сучасної аеродинаміки є вивчення надзвукових течій навколо неосесиметричних несучих тіл, що рухаються в газовому середовищі під деяким кутом атаки. Такі тіла можуть мати менший хвильовий опір, ніж тіла обертання той же довжини та об'єму. Однак, унаслідок більшої площі поверхні, сили тертя, що діють на них, можуть істотно збільшити повний опір. У зв'язку з цим становить інтерес вивчення в'язкого обтікання тіл вказаної форми.

Математичне моделювання течій суцільного середовища здійснюється за допомогою повних або певним чином спрощених рівнянь Нав'є-Стокса. Серед різних підходів до чисельного дослідження просторових течій в'язкого газу важливе місце продовжує займати теорія примежового шару. Цей підхід є досить економічним (у сенсі витрат ресурсів комп'ютера) і водночас досить точним за великих чисел Рейнольдса.

Для прикладних задач певний інтерес має клас вироджених просторових течій, який пов'язаний з рухом загострених конічних тіл. Ці тіла часто використовують як окремі елементи літальних апаратів. При виконанні певних умов навколо гострого конуса реалізується конічна течія, що дає можливість звести вихідну просторову задачу до двовимірної. Розв'язання задачі про обтікання гострого конуса дає певну інформацію, корисну для чисельного аналізу невироджених течій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню в'язких течій поблизу тіл, що не мають осьової симетрії, присвячено значну кількість експериментальних і теоретичних робіт. В статтях [1-2] наведені результати експериментів при дозвукових

швидкостях руху для літальних апаратів з поперечними перерізами у вигляді круга, квадрата і трикутника з округленими кромками. В роботі [3] запропоновано наближений метод розрахунку плівкових течій рідини по поверхні конуса з гладким поперечним перерізом.

Дослідження надзвукових течій газу поблизу твердих тіл проводились в роботах [4-10, 2]. В [4-6] на основі повних або параболізованих рівнянь Нав'є-Стокса вивчалось обтікання еліптичного конуса. В роботах [8-10] для знаходження аеродинамічних характеристик літальних апаратів з різними поперечними перерізами застосовувався програмний комплекс Ansys Fluent. Експериментальні дослідження надзвукових течій поблизу твердих поверхонь проводились в роботах [2, 7].

**Мета дослідження.** Розробити методику розрахунку аеродинамічних характеристик конічних тіл з довільним гладким поперечним перерізом при надзвуковому обтіканні на основі рівнянь Ейлера і примежового шару. Провести чисельний аналіз інтегральних характеристик біеліптичних конусів.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Розглядається задача про надзвукове обтікання гострого конуса з довільним гладким поперечним перерізом стаціонарним потоком в'язкого газу. Рівняння конічної поверхні в сферичній системі координат  $(r, \theta, \varphi)$  задається у вигляді  $\theta = \theta(\varphi)$ , де  $\theta$  – кут між твірною конуса та його віссю. Припускається, що вплив в'язкості зосереджено в тонкому шарі поблизу твердої поверхні і всю область збуреної течії між ударною хвилею та поверхнею конуса можна розділити на нев'язкий потік і примежовий шар.

Система рівнянь Ейлера, що описує стаціонарну течію нев'язкого газу, в дивергентній формі має наступний вигляд:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{C}}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

де  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{C}$  - чотирикомпонентні вектори

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} \rho u_x \\ p + \rho u_x^2 \\ \rho u_x u_y \\ \rho u_x u_z \end{pmatrix}, \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} \rho u_y \\ \rho u_x u_y \\ p + \rho u_y^2 \\ \rho u_y u_z \end{pmatrix}, \quad \vec{C} = \begin{pmatrix} \rho u_z \\ \rho u_x u_z \\ \rho u_y u_z \\ p + \rho u_z^2 \end{pmatrix},$$

$(x, y, z)$  - декартова система координат;  $u_x, u_y, u_z$  - компоненти вектора швидкості вздовж осей  $x, y, z$  відповідно;  $p$  – тиск;  $\rho$  – густина газу.

Система рівнянь (1) доповнюється умовою сталості повної ентальпії течії

$$\frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}{2} = const, \quad (2)$$

де  $k$  – показник адіабати, а також граничними умовами на поверхні конуса та на ударній хвилі.

Розглядалися такі режими обтікання, коли ударна хвиля, що утворюється перед конусом, приєднана до його вершини і нев'язка течія навколо нього є конічною. Інтегрування системи диференціальних рівнянь (1) проводилось за допомогою стаціонарного аналога метода Годунова С.К. [11] з використанням принципу устанавлення розв'язку за поздовжньою координатою  $x$ .

Система рівнянь просторового ламінарного примежового шару на конічній поверхні має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(r\rho u) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(r\rho v) = 0, \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\rho\omega}{r} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \rho v \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{\rho}{r} \frac{\partial r}{\partial \xi} \omega^2 = -\frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial \zeta} \right), \quad (4)$$

$$\rho u \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + \frac{\rho\omega}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \eta} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial \zeta} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial r}{\partial \xi} u\omega = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \mu \frac{\partial \omega}{\partial \zeta} \right), \quad (5)$$

$$\rho u \frac{\partial h}{\partial \xi} + \frac{\rho\omega}{r} \frac{\partial h}{\partial \eta} + \rho v \frac{\partial h}{\partial \zeta} = u \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial \zeta} \right) + \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \zeta} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega}{\partial \zeta} \right)^2 \right], \quad (6)$$

Крайові умови

$$u = \omega = v = 0, \quad h = h_w \quad \text{при } \zeta = 0, \quad (7)$$

$$u \rightarrow u_e, \quad \omega \rightarrow \omega_e, \quad h \rightarrow h_e \quad \text{при } \zeta \rightarrow \infty, \quad (8)$$

Тут  $(\xi, \eta, \zeta)$  – ортогональна система координат, яка зв'язана з поверхнею конуса ( $\xi$  – координата, що відраховується від вершини конуса вздовж твірної,  $\eta$  – полярний кут в площині, яка перпендикулярна до осі конуса,  $\zeta$  – відстань по нормалі до поверхні);  $r = \xi\psi(\eta)$ ;  $u, \omega, v$ , – компоненти вектора швидкості, направлені вздовж осей  $\xi, \eta, \zeta$ ;  $p$  – тиск;  $\rho, h$  – густина і ентальпія газу;  $c_p$  – теплоємність при постійному тиску;  $\mu, \lambda$  – коефіцієнти молекулярної в'язкості та теплопровідності. Індокси «w» і «e» відносяться до параметрів на стінці та на зовнішній межі примежового шару. Функція  $\psi(\eta)$ , яка задає форму поперечного перерізу конуса, має вигляд

$$\psi(\eta) = \frac{1}{1+R^2} \left[ R^2 + \left( \frac{dR}{d\eta} \right)^2 + R^4 \right]^{0.5}, \quad R = \operatorname{tg}\theta(\eta).$$

Система рівнянь примежового шару доповнюється рівнянням стану для ідеального газу та степеневими залежностями молекулярної в'язкості та теплопровідності.

При конічній зовнішній течії задача про примежовий шар (3)-(8) за допомогою заміни змінних може бути зведена до двовимірної задачі. Для розв'язання цієї задачі застосовувався скінченно-різницевий метод Петухова І.В. [12].

В результаті розв'язання наведених вище крайових задач можуть бути знайдені поля швидкостей і тиску в примежовому шарі і в нев'язкій області течії, а також локальні коефіцієнти тиску  $C_p$  і тертя  $C_{f_1}$ ,  $C_{f_2}$

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty}, \quad C_{f_1} = \frac{1}{q_\infty} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial \zeta} \right)_W, \quad C_{f_2} = \frac{1}{q_\infty} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial \zeta} \right)_W, \quad q_\infty = \frac{\rho_\infty u_\infty^2}{2}.$$

В роботі припускалось, що течія має площу симетрії. В цьому випадку вектор аеродинамічної сили  $\vec{F}$ , який розташований в площі симетрії, може бути розкладений на дві складові: осьову силу  $\vec{R}$ , направлену вздовж осі конуса  $x_1$ , і нормальну силу  $\vec{N}$ , яка є перпендикулярною до цієї осі.

Коефіцієнт осьової сили може бути поданий наступним чином:

$$C_R = \frac{R}{q_\infty S_{mid}} = \frac{1}{S_{mid}} \iint_{S_{бок}} \left[ C_p \cos(\vec{n} \wedge \vec{i}) + C_{f_1} \cos(\vec{t}_1 \wedge \vec{i}) + C_{f_2} \cos(\vec{t}_2 \wedge \vec{i}) \right] dS,$$

де  $\vec{t}_1$ ,  $\vec{t}_2$ ,  $\vec{n}$  – одиничні вектори ортогональної системи координат  $(\xi, \eta, \zeta)$ ,  $\vec{i}$  – одиничний вектор вздовж осі конуса;  $S_{mid}$ ,  $S_{бок}$  – площі міделевого перерізу та бічної поверхні конуса. Аналогічним чином визначаються коефіцієнти нормальної сили  $C_N$  і поздовжнього моменту  $m_z$

$$C_N = \frac{N}{q_\infty S_{mid}}, \quad m_z = \frac{M_z}{q_\infty S_{mid} L}.$$

За відомими значеннями величин  $C_R$  і  $C_N$  можна обчислити коефіцієнти лобового опору  $C_X$  і підйомної сили  $C_Y$ , а також аеродинамічну якість  $K = C_Y / C_X$

$$C_Y = C_N \cos \alpha - C_R \sin \alpha, \quad C_X = C_N \sin \alpha + C_R \cos \alpha.$$

На основі чисельного інтегрування рівнянь Ейлера (1) і примежового шару (3)-(6) проведено розрахунки аеродинамічних коефіцієнтів для біеліптичних конусів. Форма поверхні цих тіл задається трьома геометричними параметрами  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\theta_k$  ( $\theta_k$  - напівкут конуса в площині великої півосі,  $\delta_1$  та  $\delta_2$  коефіцієнти еліптичності нижнього і верхнього напівеліпсів). Результати розрахунків при числі Маха  $M_\infty=6$  і куті  $\theta_k=15^\circ$  наведені на рисунках 1-2.

На рисунку 1 наведені залежності коефіцієнта опору  $C_x$  та аеродинамічної якості  $K$  від кута атаки  $\alpha$  для біеліптичного конуса з геометричними параметрами  $\delta_1=1$  і  $\delta_2=2$  при різних значеннях числа Рейнольдса  $Re$  ( $Re=\rho_\infty u_\infty l / \mu_\infty$ ,  $l$  – висота конуса). При  $\alpha=0^\circ$  це тіло володіє несучими властивостями; при  $\alpha \approx -3.7^\circ$  – має нульову підйомну силу і мінімальний лобовий опір. Вплив примежового шару призводить до значного збільшення лобового опору. Так, наприклад, при  $\alpha=0^\circ$  добавки внаслідок сил в'язкості складають 9%, 28%, 89% від хвильового опору  $X_{хв}$  при числах  $Re=10^6$ ,  $10^5$  та  $10^4$  відповідно. Внесок в'язких складових у підйомну силу і в поздовжній момент є незначним (0.3÷3% при  $Re=10^6 \div 10^4$ ). Врахування сил в'язкості призводить до значного зниження максима-

льного значення аеродинамічної якості  $K_{\max}$ , причому зі зменшенням числа  $Re$  максимум стає менш вираженим і зміщується в область більших значень кута  $\alpha$ .

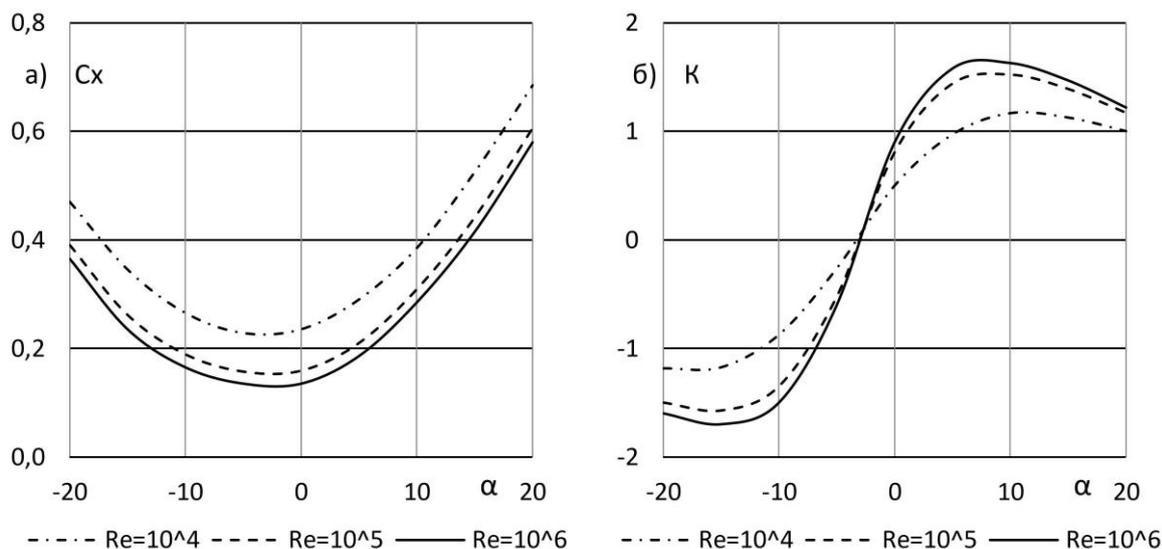


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта опору  $C_x$  та аеродинамічної якості  $K$  від кута атаки  $\alpha$  при різних значеннях числа Рейнольдса  $Re$

На рисунку 2 показано вплив форми навітряної (коефіцієнт  $\delta_1$ ) та підвітряної (коефіцієнт  $\delta_2$ ) поверхні біеліптичного конуса на його аеродинамічні коефіцієнти при значенні кута  $\alpha=5^\circ$ . Збільшення величини  $\delta_1$  призводить до зменшення коефіцієнтів  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $m_z$ . Аеродинамічна якість  $K$  при цьому може зростати або спадати залежно від величини  $\delta_2$ . Збільшення величини  $\delta_2$  при постійному значенні  $\delta_1$  відносно слабо впливає на величину  $C_x$  і призводить до сильного зростання коефіцієнтів  $C_y$ ,  $|m_z|$ ,  $K$ . Найбільшу підйомну силу при  $\alpha=5^\circ$  має конус із найбільш опуклою нижньою ( $\delta_1=1$ ) і найменш опуклою верхньою ( $\delta_1=3$ ) поверхнями.

**Висновки.** Запропоновано методику розрахунку аеродинамічних характеристик конічних тіл з довільним гладким поперечним перерізом при надзвуковому обтіканні, що ґрунтується на чисельному інтегруванні рівнянь Ейлера і ламінарного примежового шару. Проаналізовано вплив геометричних і фізичних параметрів на інтегральні характеристики течії. Показано, що число Рейнольдса і форма поперечного перерізу суттєво впливають на величину аеродинамічних коефіцієнтів біеліптичного конуса.

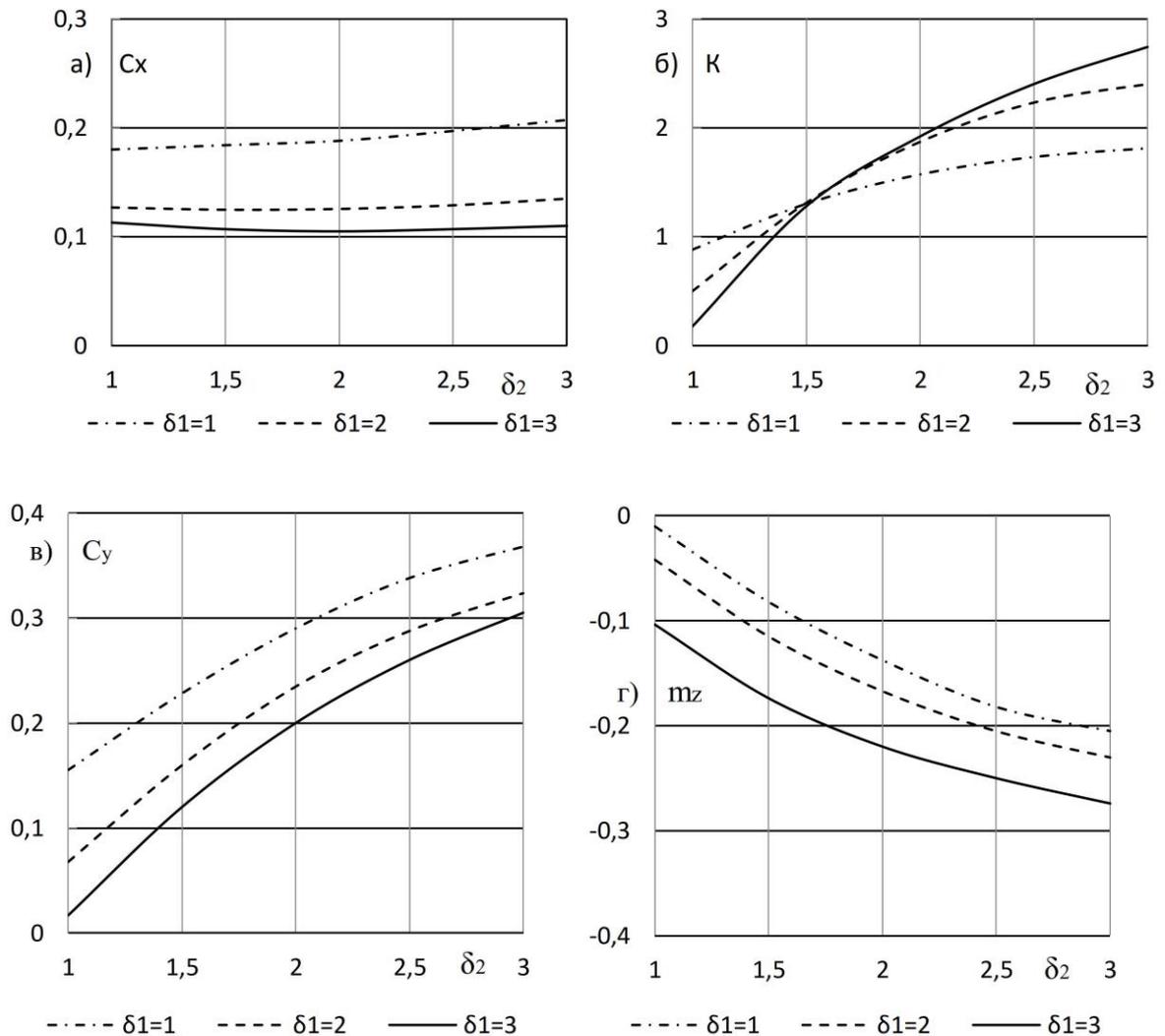


Рисунок 2 – Залежність аеродинамічних коефіцієнтів від геометричних параметрів  $\delta_1$  і  $\delta_2$  ( $Re=10^6$ )

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Mitchell R.R., Webb M.B., Roetzel J.N. A study of the base pressure distribution of a slender body of square cross-section. In: *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.*, 2008-0428, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. <https://doi.org/10.2514/6.2008-428>.
2. Tadakuma K., Tani Y., Aso S. Effect of Fuselage Cross Section on Aerodynamic Characteristics of Reusable Launch Vehicles. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2016, **6**, 222-233. <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2016.63017>.
3. Tonkoshkur I.S. Mathematical modeling of flows of rheologically complex fluid over the surface of a cone. *Problems of applied mathematics and mathematic modeling*. 2024. Vol. 24. P. 214-221. <https://doi.org/10.15421/322422>.
4. Bashkin V.A., Egorov I.V. Numerical modelling of dynamics of viscous perfect gas. M.: Fizmatlit, 2012. 372 p. (in Russian).

5. Paredes P., Theofilis V. Accurate Parabolic Navier-Stokes solutions of the supersonic flow around an elliptic cone. *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting*. 2013, Grapevine, Texas. <https://doi.org/10.2514/6.2013-670>.
6. Kotebavi V., Rakesh S. G. Supersonic Flow over Elliptic Cone with Different Ellipticity Ratio. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2023, Vol. 16, No. 12, pp. 2494-2503. <https://doi.org/10.47176/jafm.16.12.1865>.
7. Wilcox F., Birch T., Allen J. Force, surface pressure, and flowfield measurements on a slender missile configuration with square cross-section at supersonic speeds. *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*. 2004, Providence, Rhode Island. <https://doi.org/10.2514/6.2004-5451>.
8. Mahjoob S., Mani M., Rahni M.T. Aerodynamic performance analysis of bodies with different cross-sections. *20th AIAA Applied Aerodynamics Conference 2002*. St. Louis, Missouri. <https://doi.org/10.2514/6.2002-2941>.
9. Nallappan R., Prasath M. Analysis of Missile Bodies with Various Cross sections and Enhancement of Aerodynamic Performance. *International Conference on Systems, Science, Control, Communication, Engineering and Technology*. 2015. 115-119. Print.
10. Chen J., Fan X. Shape Optimization of the Cross-Section for Noncircular Hypersonic Missile Forebody. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2020, 9 p. <https://doi.org/10.1155/2020/8885494>
11. Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics / S.K. Godunov et al. M.: Nauka. 1976. 400 p. (in Russian).
12. Kotlyar Y.M., Sovrechny V.D., Strizhenov D.S. Methods and Problems of Heat and Mass Transfer. M.: Mashinostroenie, 1987. 320 p. (in Russian).

Received 02.06.2025.  
Accepted 09.06.2025.

### ***Numerical analysis of aerodynamic characteristics of non-circular cones in supersonic flow***

*Numerical modeling of viscous gas flows around non-axisymmetric lifting bodies streamlined at an angle of attack is one of the urgent problems of modern aerodynamics. Such bodies have high aerodynamic quality and are promising in the creation of maneuverable aircraft.*

*The paper considers the problem of supersonic flow of a viscous gas around a sharp cone with an arbitrary smooth cross-section. It was assumed that the effect of viscosity is concentrated in a thin layer near the solid surface, and the entire flow region between the body surface and the shock wave can be divided into an inviscid flow and a boundary layer.*

*The flow regimes considered were when the shock wave formed in front of the cone is attached to its top and the inviscid flow around it is conical. The integration of the system of differential equations of Euler was carried out using a stationary analogue of the Godunov method, using the principle of establishing a solution along the longitudinal coordinate. To solve the boundary layer problem, the Petukhov finite-difference method was used. As a result of solving the specified boundary value problems, the velocity and pressure fields in the*

*boundary layer and in the inviscid flow region, as well as the integral aerodynamic coefficients, were found.*

*Based on the proposed methodology, calculations of aerodynamic coefficients for bi-elliptical cones were performed. The surface shape of these bodies is specified by three geometric parameters  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\theta_k$  ( $\theta_k$  is the half-angle of the cone in the plane of the major semi-axis,  $\delta_1$  and  $\delta_2$  are the ellipticity coefficients of the lower and upper semi-ellipses).*

*Numerical analysis of aerodynamic characteristics showed that taking into account the influence of the boundary layer leads to a significant increase in drag and a decrease in aerodynamic quality. The contribution of viscous components to the lift and longitudinal moment is insignificant. The shape of the cone cross-section has a significant effect on the value of its aerodynamic coefficients.*

*Keywords: supersonic flow, drag coefficient, lift force, cone, cross-section, Euler equations, boundary layer.*

**Тонкошкур Ілля Сергійович** – к. ф.-м. н., доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Tonkoshkur Illia Serhiiovych** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University.

В.І. Кобзар, О.Ю. Кривенко, А.В. Пікільняк

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ КРИТЕРІЇВ НАДІЙНОСТІ

*Анотація.* У статті розглянуто питання підвищення надійності та ефективності гідротранспортних систем, які є критичними елементами багатьох промислових процесів. Проаналізовано сучасний стан таких систем, зокрема їхню складність як технічних об'єктів, а також фактори, що впливають на знос елементів, включаючи гідроабразивний вплив. Обґрунтовано доцільність використання стохастичних моделей для опису процесів зношування, що дозволяє точніше прогнозувати ресурс трубопроводів та іншого обладнання. Запропоновано математичні та оптимізаційні моделі, які враховують стохастичну природу експлуатаційних параметрів, для вибору раціональних схем гідротранспорту. Проведено порівняльний аналіз різних схем функціонування систем, встановлено критерії надійності та ефективності. Окрему увагу приділено економічним аспектам експлуатації, методикам моніторингу та прогнозування технічного стану. Результати досліджень мають практичне значення для проектування та обслуговування гідротранспортних систем, що дозволяє знизити витрати, пов'язані з простоями, та підвищити загальну ефективність роботи підприємств.

*Ключові слова:* гідротранспортні системи, надійність, гідроабразивний знос, стохастичне моделювання, трубопровід, ґрунтовий насос, технічне обслуговування, ефективність, оптимізація, промислова експлуатація.

**Постановка проблеми.** Гідротранспортні системи є важливими складовими промислових підприємств, забезпечуючи транспортування значних обсягів твердих матеріалів. Водночас, зростаючі вимоги до їх ефективності та надійності висувають потребу у науково обґрунтованих підходах до проектування та експлуатації. Нині відсутні універсальні методики вибору оптимальних схем транспортування гідросумішей, особливо для багатоступневих систем, а також моделі, що дозволяють точно оцінити надійність обладнання та трубопроводів. Це призводить до помилок у проектуванні, частих відмов і аварій, що супроводжуються значними фінансовими втратами через простой. Тому актуальною є розробка комплексного підходу до оцінки та підвищення надійності гідротранспортних систем, з урахуванням особливостей їх функціонування, факторів зношування та стохастичного характеру деградаційних процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гідротранспортні системи — це складні технічні об'єкти, що функціонують у жорстких умовах експлуатації та піддаються дії багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів. На відміну від класичних транспортних

механізмів, їх функціонування не припиняється повністю у разі відмови окремих елементів, що підвищує загальну надійність, але суттєво ускладнює аналіз і прогнозування технічного стану. Ключовими елементами таких систем є ґрунтові насоси, трубопроводи, арматура, які зазнають впливу абразивних властивостей транспортованих матеріалів, концентрації гідросуміші, неусталених режимів, технологічних дефектів, старіння та помилок персоналу. Аналіз літератури підтверджує, що механізм гідроабразивного зношування обумовлений пластичною деформацією та мікрорізнанням матеріалу [1].

Системи гідротранспортування, залежно від сфери застосування, мають свою специфіку. Наприклад, системи транспортування вугілля мають справу з високою абразивністю матеріалу, у той час як у шламових системах алюмінієвого виробництва до механічного зносу додається ще й хімічна корозія. Золошлакові системи на ТЕС працюють в умовах підвищеної температури та гетерогенності середовища. Такі особливості потребують окремого врахування при створенні моделей для розрахунку надійності [3, 4].

У більшості традиційних підходів до розрахунку надійності гідротранспортних систем процес гідроабразивного зношування описується як детермінований, що дозволяє розрахувати лише середнє значення зносу. Однак такий підхід ігнорує стохастичну природу експлуатаційних умов, унаслідок чого можуть виникати значні похибки у прогнозах ресурсу трубопроводів і насосів [5, 6]. Показано, що для гідроабразивного зносу характерне нелінійне зростання дисперсії — не лінійно з часом, як у випадку сильного перемішування, а пропорційно квадрату часу, що свідчить про відсутність однорідності у впливі чинників зношування. Це вимагає застосування стохастичних моделей з урахуванням змінних експлуатаційних параметрів [2, 5].

Використання методів моделювання випадкових процесів, зокрема теорії Марковських ланцюгів, як зазначено в сучасних працях [2, 3], є перспективним для визначення ймовірностей відмов елементів системи та оптимізації технічного обслуговування. Надійність гідротранспортних систем тісно пов'язана з економічною доцільністю їх експлуатації. У низці досліджень [5, 6] обґрунтовано необхідність розробки інтегрованих показників ефективності, які враховують не лише витрати на технічне обслуговування та енергоспоживання, а й потенційні втрати через простой, пов'язані з відмовами систем. Зокрема, впровадження систем моніторингу робочих параметрів насосних станцій дозволяє скоротити енергоспоживання до 21% [4], що є свідченням ефективності комплексного підходу до управління надійністю.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності та надійності гідротранспортних систем шляхом вибору раціональних схем транспортування гідросумішей, розробки математичних моделей для оцінки показників надійності ґрунтових насосів і трубопроводів з урахуванням стохастичної природи гідроабразивного зносу та змінних експлуатаційних умов. Особлива увага приділяється оптимізації розміщення насосних станцій та визначенню параметрів, що забезпечують безперебійну роботу систем.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Гідротранспортні системи, що використовуються у видобуванні та транспортуванні залізної руди, мають свої характе-

рні особливості. Зокрема, рудна пульпа вирізняється високою абразивністю та змінною концентрацією, що підвищує зношування елементів системи і чутливість до зміни гідравлічних режимів. Крім того, хімічний склад пульпи може спричиняти додаткову корозію, особливо при тривалому контакті з внутрішніми поверхнями трубопроводів. Ці фактори обов'язково слід враховувати при побудові моделей та методик оцінки надійності гідротранспортних систем у гірничорудній промисловості.

У традиційних підходах гідроабразивний знос трубопроводів часто розглядається як детермінований процес, що дозволяє оцінити лише середній рівень зношування. Проте у випадку транспортування залізної руди, де умови експлуатації постійно змінюються (наприклад, швидкість потоку, розмір частинок, концентрація), такий підхід є недостатнім. Ігнорування варіативності зносу призводить до суттєвих похибок у прогнозуванні ресурсу обладнання — або до його передчасного виходу з ладу, або до нерационального використання.

Доцільніше моделювати гідроабразивний знос як стохастичний процес. Попри поширене застосування такого підходу в механіці машин, для трубопроводів у рудопроводах він використовується рідко. Більшість моделей базується на припущенні про лінійне зростання дисперсії зносу в часі. Проте дослідження свідчать, що у випадку транспортування рудної пульпи дисперсія зростає пропорційно квадрату часу, що вказує на відсутність сильного перемішування і однорідності умов. Це важливе спостереження слід враховувати для підвищення точності прогнозів ресурсу та надійності рудопроводів.

Математична формалізація стохастичних процесів зношування вимагає застосування спеціальних методів аналізу випадкових процесів. Для опису гідроабразивного зносу стінок трубопроводів можна використовувати модель випадкового процесу з незалежними приростами. В такому випадку приріст зносу за малий проміжок часу  $\Delta t$  можна описати як випадкову величину з певними параметрами розподілу. Якщо позначити через  $X(t)$  випадковий процес накопиченого гідроабразивного зносу до моменту часу  $t$ , то для нього виконуються наступні умови:

1.  $X(0) = 0$ ;
2. Для будь-яких моментів часу  $t^1 < t^2 < \dots < t_n$  випадкові величини  $X(t_1), X(t_2) - X(t_1), \dots, X(t_n) - X(t_{n-1})$  незалежні;
3. Для будь-яких  $t > 0$  та  $h > 0$  розподіл випадкової величини  $X(t+h) - X(t)$  залежить тільки від  $h$ .

Такий підхід дозволяє більш точно описати процес гідроабразивного зношування та прогнозувати його розвиток у часі, що є необхідною умовою для адекватної оцінки надійності гідротранспортних систем.

На надійність гідротранспортних систем у гірничорудній промисловості впливають три ключові чинники: якість обладнання та трубопроводів, організація обслуговування (ремонтна політика та профілактика), а також схема функціонування системи. Ці

елементи мають різну вагу у загальній оцінці надійності та взаємодіють між собою, формуючи складну ієрархію показників.

Особливої уваги потребують ґрунтові насоси, що широко застосовуються для транспортування залізорудної пульпи. Їх надійнісна оцінка ускладнюється нерівномірним зносом проточних частин, через що складно точно встановити критичну межу, після якої насос вважається непридатним. У таких випадках необхідно залучати статистичні дані щодо зносу деталей – робочих коліс, корпусів, захисних дисків тощо.

Аналіз багаторічної експлуатації насосного обладнання дозволяє визначити закони розподілу часу між відмовами ключових компонентів. Це дає змогу оцінити ймовірність безвідмовної роботи насоса, оптимізувати графіки заміни зношуваних елементів і планувати обсяг запасних частин для забезпечення безперервної роботи рудопроводу. Важливо враховувати взаємозв'язок між зносом різних елементів проточної частини насоса. Його ігнорування занижує оцінку надійності системи. Крім того, значною проблемою є обмежена доступність точних даних про напрацювання до відмови окремих деталей, що ускладнює точне планування технічного обслуговування.

Комплексна оцінка надійності гідротранспортних систем, що застосовуються для транспортування залізорудної пульпи, повинна враховувати їхню складність як технічних об'єктів із численними взаємозалежними елементами. Важливо оцінювати не лише надійність окремих вузлів, але й структуру системи, режими роботи, умови експлуатації та можливість резервування ключових компонентів.

Основні показники надійності таких систем поділяють на чотири групи:

1. Безвідмовність – імовірність роботи без відмов, інтенсивність відмов, середнє напрацювання на відмову;
2. Ремонтпридатність – середній час відновлення, імовірність відновлення в заданий час;
3. Довговічність – середній і гарантований ( $\gamma$ -процентний) ресурс;
4. Комплексні – коефіцієнти готовності та технічного використання.

Вибір конкретних показників залежить від призначення системи, її архітектури та умов рудопровідної експлуатації. У теорії надійності розрізняють два основні підходи: аналіз за станом окремих елементів та за зміною визначальних параметрів. Перший вимагає детального опису всіх складових системи та обліку кореляцій між ними, що часто складно реалізувати для великих гідросистем. Натомість другий підхід базується на спостереженні за параметрами, які відображають загальний стан системи — наприклад, продуктивність, тиск або енергоспоживання. Цей метод дозволяє оцінити надійність без необхідності повного опису кожного компонента, що особливо цінно в умовах гірничорудної промисловості, де доступ до елементів системи обмежений, а зовнішні умови експлуатації постійно змінюються.

Для оцінки надійності обладнання, трубопроводів і арматури в рудопроводах застосовують моделі стаціонарних випадкових процесів і математичну теорію надійності. При аналізі надійності гідротранспортної системи в цілому, як складної технічної структури, використовують методи Марковських процесів, теорію масового обслуговування та логіко-ймовірнісні моделі на основі графів. Закони розподілу ймовірностей випа-

дкових величин, що характеризують знос або відмови компонентів, визначають за статистичними даними, отриманими під час експлуатації. Якщо обсяг вибірки достатній, використовують критерій Пірсона ( $\chi^2$ ), а при невеликих вибірках — критерій Вілка (W) для перевірки нормальності розподілу.

Дослідження гідротранспортних систем для транспортування залізорудної пульпи проводять у лабораторних та промислових умовах. Лабораторні дослідження забезпечують контрольованість умов та прискорене моделювання процесів, які в реальній експлуатації тривають роками. Це дає змогу ефективно підбирати матеріали та режимні параметри для обладнання. У промислових умовах експерименти проводяться безпосередньо на діючих рудопроводах. Для моніторингу використовуються ультразвукові товщиноміри, витратоміри, тискоміри, манометри й рівнеміри. Перевагою таких досліджень є можливість врахувати повний спектр експлуатаційних чинників: реальні навантаження, технічне обслуговування, умови середовища та характерні режими роботи. Для обробки експериментальних даних, отриманих у лабораторних і промислових дослідженнях рудопроводів, використовуються статистичні методи, що дозволяють визначити розподіл таких параметрів, як інтенсивність зношування, напрацювання на відмову, час відновлення тощо. При великій вибірці гіпотези про форму розподілу перевіряють за критерієм Пірсона ( $\chi^2$ ). Якщо вибірка невелика (менше 50 спостережень) і перевіряється нормальність розподілу, застосовують критерій W. Для порівняння параметрів надійності обладнання в різних експлуатаційних умовах використовують U-критерій Вілкоксона. Для оцінки надійності систем транспортування залізорудної пульпи застосовують математичні моделі, що враховують стохастичний характер зміни гідродинамічних параметрів потоку та геометрії рудопроводів. Структурні моделі описують систему як сукупність взаємозалежних елементів.

У спрощеному випадку система подається як:

Послідовне з'єднання елементів:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t), \quad (1)$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи системи за час  $t$ ,  $P_n(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи  $n$ -го елемента.

Паралельне з'єднання елементів:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1(t)) \cdot (1 - P_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_n(t)). \quad (2)$$

Для складних схем рудопроводів із резервуванням або змішаними з'єднаннями використовують методи декомпозиції, мінімальних шляхів і перерізів, а також статистичне моделювання для розрахунку загальної ймовірності безвідмовної роботи.

Одним з найбільш потужних інструментів для аналізу надійності гідротранспортних систем є теорія Марковських випадкових процесів. Марковські моделі дозволяють враховувати ймовірнісний характер процесів відмов та відновлень, а також взаємодію різних елементів системи. В Марковській моделі гідротранспортної системи всі можливі стани системи можна представити як дискретні стани  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), а процес

переходу з одного стану в інший описується матрицею інтенсивностей переходів  $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$ , де  $\lambda_{ij}$  - інтенсивність переходу зі стану  $S_i$  в стан  $S_j$

Система диференціальних рівнянь Колмогорова для ймовірностей станів  $p(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\}$  має вигляд:

$$\frac{dp(t)}{dt} = p(t) \cdot \Lambda \quad (3)$$

Для стаціонарного випадку, коли  $t \rightarrow \infty$ , система рівнянь спрощується до:

$$p \cdot \Lambda = 0$$

З додатковою умовою нормування:

$$p^1 + p^2 + \dots + p_n = 1. \quad (4)$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дозволяє визначити граничні ймовірності станів системи, що дає змогу розрахувати такі показники надійності, як коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання, середнє напрацювання на відмову та інші. Важливим аспектом моделювання є визначення місць розташування послідовно включених ґрунтових насосів по магістралі. Традиційні методики розрахунку відстані між насосами часто не враховують стохастичні коливання напору, що розвивається насосом, і енергетичних втрат по трубопроводу. Врахування цих параметрів є необхідним для вибору оптимальної відстані між насосами. Задача оптимального розміщення насосних станцій може бути сформульована як задача нелінійного програмування:

$$\min F(x^1, x^2, \dots, x_n), \quad (5)$$

при обмеженнях:

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, j = 1, 2, \dots, p, \quad (7)$$

де  $F$  – цільова функція (наприклад, сумарні приведені витрати на спорудження та експлуатацію системи),  $x_i$  – координати розміщення насосних станцій,  $g_i$  і  $h_j$  – обмеження у вигляді нерівностей та рівнянь відповідно.

Для вирішення цієї задачі можуть використовуватися методи нелінійного програмування, зокрема:

- метод множників Лагранжа;
- метод гілок і меж;
- генетичні алгоритми тощо.

Важливим елементом оцінки надійності гідротранспортних систем є прогнозування ресурсу трубопроводів. Для цього розробляються спеціальні математичні моделі, що враховують стохастичний характер гідроабразивного зносу стінок трубопроводів. Одна з таких моделей базується на представленні процесу гідроабразивного зносу як випадкового процесу з незалежними приростами. Нехай  $\delta(t)$  - випадковий процес, що

описує залишкову товщину стінки трубопроводу в момент часу  $t$ . Тоді ймовірність безвідмовної роботи трубопроводу до моменту часу  $t$  можна визначити як:

$$R(t) = P\{\delta(\tau) > \delta_{\min} \text{ для всіх } \tau \in [0, t]\}, \quad (8)$$

де  $\delta_{\min}$  - мінімально допустима товщина стінки трубопроводу.

Для визначення цієї ймовірності можна використовувати методи теорії випадкових процесів, зокрема, метод перших перетинів. Суть методу полягає у визначенні розподілу випадкової величини  $\tau = \inf\{t: \delta(t) \leq \delta_{\min}\}$ , тобто моменту першого перетину процесом  $\delta(t)$  рівня  $\delta_{\min}$ . Тоді ймовірність безвідмовної роботи до моменту  $t$  визначається як:

$$R(t) = P\{\tau > t\}. \quad (9)$$

Знаючи розподіл випадкової величини  $\tau$ , можна визначити середній ресурс трубопроводу, а також інші показники надійності.

Підвищення ефективності напірних гідротранспортних систем може бути досягнуто шляхом вибору раціональної схеми транспортування гідросуміші, заснованого на показниках надійності систем, з урахуванням стохастичного характеру зміни їх режиму роботи в залежності від основних параметрів ґрунтових насосів і потоку гідросуміші.

Комплексний підхід до оптимізації гідротранспортних систем включає в себе кілька ключових напрямків:

1. Вибір оптимальної структурної схеми системи з урахуванням надійності та економічних показників;
2. Оптимізація режимів роботи обладнання для забезпечення максимальної ефективності та мінімального зносу;
3. Розробка стратегії технічного обслуговування та ремонту, що забезпечує необхідний рівень надійності при мінімальних витратах;
4. Впровадження сучасних технологій моніторингу та діагностики стану обладнання для своєчасного виявлення та попередження відмов.

Важливим аспектом вибору раціональної схеми є визначення оптимальних об'ємів приймальних зумпфів. На основі надійнісних властивостей ділянок гідротранспортної системи розраховуються об'єми проміжних зумпфів. При цьому необхідно враховувати безперервну зміну витрати, що розвивається ґрунтовими насосами, обумовлену зносом останніх, нестабільністю параметрів транспортованої гідросуміші тощо.

Оптимальний об'єм проміжної ємності може бути визначений на основі аналізу балансу потоків гідросуміші, що надходить у ємність та відкачується з неї. Нехай  $Q_1(t)$  і  $Q_2(t)$  - випадкові процеси, що описують витрати гідросуміші на вході та виході ємності відповідно. Тоді зміна об'єму гідросуміші в ємності  $V(t)$  описується стохастичним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q^1(t) - Q^2(t). \quad (10)$$

Оптимальний об'єм ємності  $V_{opt}$  повинен забезпечувати заданий рівень надійності функціонування системи при мінімальних витратах на спорудження та експлуатацію ємності:

$$V_{opt} = \arg \min\{C(V) : P(\text{переливу або осушення}) \leq \varepsilon\}, \quad (11)$$

де  $C(V)$  - функція вартості ємності, залежна від її об'єму,  $\varepsilon$  - допустима ймовірність аварійної ситуації (переливу або осушення ємності).

Практичне значення досліджень надійності гідротранспортних систем полягає в розробці методик, що підвищують ефективність їх проектування та експлуатації. Це охоплює обґрунтування термінів ремонту, параметрів трубопроводів, потреб у запасних деталях, розміщення насосів і об'ємів ємностей.

На основі результатів сформовано наступні рекомендації:

- визначення оптимальних інтервалів ремонтно-профілактичних робіт для зниження витрат при збереженні надійності.
- розрахунок мінімально допустимої товщини стінок труб з урахуванням гідроабразивного зносу.
- визначення необхідного запасу деталей насосів для безперебійної роботи.
- оптимальне розміщення насосів з урахуванням коливань напору.
- розрахунок об'ємів приймальних ємностей для роботи при нестабільних потоках.

Для обґрунтованого вибору раціональної структури гідротранспортної системи важливо враховувати не лише гідравлічні та енергетичні характеристики, а й надійнісні показники. Різні варіанти побудови систем – з резервуванням, використанням проміжних зумпфів або багатоступеневою подачею – суттєво відрізняються за ефективністю, тривалістю безвідмовної роботи та здатністю до швидкого відновлення після відмов. У таблиці 1 наведено порівняння основних показників надійності для типових схем гідротранспортних систем.

Аналіз даних свідчить, що найвищі значення коефіцієнта готовності та технічного використання спостерігаються в одноступеневій схемі з ненавантаженим резервом. Проте її застосування може бути обмеженим через конструктивні або економічні чинники. Водночас триступенева система з проміжними зумпфами забезпечує високий рівень надійності за умов значної довжини траси транспортування. Економічна доцільність схем із резервуванням та зумпфами обумовлена зменшенням витрат від простоїв, що компенсує зростання капітальних та експлуатаційних витрат. Таким чином, вибір конфігурації гідротранспортної системи має базуватись на системному аналізі сукупності техніко-економічних показників з урахуванням особливостей експлуатаційного середовища.

Порівняння показників надійності схем гідротранспортних систем

Схема гідротранспортної системи	Коеф. готовності	Середнє напр. на відмову, год	Середній час відновлення, год	Коефіцієнт техн. використання
Одноступенева без резервування	0.82	180	39.5	0.80
Одноступенева з навантаженим резервом (1+1)	0.94	420	26.8	0.92
Одноступенева з невантаженим резервом (1+1)	0.96	450	18.7	0.94
Двоступенева без проміжного зумпфа	0.76	150	47.3	0.72
Двоступенева з проміжним зумпфом	0.88	380	51.8	0.86
Триступенева з двома проміжними зумпфами	0.92	410	35.6	0.89

**Висновки.** Гідротранспортні системи є критично важливою складовою промислової інфраструктури, що забезпечує транспортування великих обсягів матеріалів. Підвищення їх надійності досягається через оптимізацію схем транспортування з урахуванням стохастичних процесів гідроабразивного зношування та варіативності режимів роботи системи.

Розроблені математичні моделі для оцінки надійності трубопроводів та насосів дозволяють обґрунтовано вибирати найбільш ефективні конфігурації систем. Аналіз показників надійності свідчить, що схеми з резервуванням обладнання та проміжними ємностями забезпечують високий рівень надійності, попри підвищені капітальні та експлуатаційні витрати, завдяки зниженню ризиків від простоїв. Оптимізація технічного обслуговування шляхом комбінування планово-попереджувальних робіт і обслуговування за технічним станом дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати. Реалізація результатів досліджень на промислових об'єктах демонструє значний економічний ефект, підтверджуючи необхідність подальшого розвитку наукових досліджень у цій галузі.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Основи корозійно-механічної тріщиностійкості трубопроводів : моногр. / В.Д. Макаренко, Ю.Л. Винников, О.Е. Чигиринець [та ін.]. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2024. – 124 с.
2. He, Z., & Wang, H. Predicting Future Deterioration of Hydraulic Steel Structures with Markov Chain and Multivariate Samples of Statistical Distributions // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – Article ID 360532. – DOI: 10.1155/2014/360532.
3. Liu, Q., Zhang, Y., & Zhou, L. Hydraulic System Reliability Analysis of Slurry Transportation Based on Stochastic Failure Petri Net // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 644–650. – P. 832–836. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.832.
4. Панченко В. О. Спеціальні гідромашини : навч. посіб. / В. О. Панченко. – Суми : СумДУ, 2020. – 186 с.
5. Котило О. В., Малигін Б. В., Шкільнюк А. О. Зменшення гідроабразивного зносу напірних сталевих пульпопроводів за рахунок магнітно-імпульсної обробки // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 116–120.
6. Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. Гідравлічний транспорт (монографія). – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, «Редакція гірничої енциклопедії», 2009. – 436 с.

Received 16.06.2025.  
Accepted 20.06.2025.

***Optimization of hydrotransport system parameters taking into account reliability criteria***

*The article explores the problem of improving the reliability and efficiency of hydrotransport systems, which play a crucial role in many industrial processes involving the movement of large volumes of solid-liquid mixtures. These systems operate under complex conditions, being exposed to intensive hydroabrasive wear and variable loads. Recent studies highlight the need to move beyond traditional deterministic models that estimate average wear, as they fail to capture the stochastic nature of degradation under real operating conditions. Instead, probabilistic models based on the theory of stochastic processes and Markov chains have proven effective in predicting the reliability and remaining service life of pipelines and slurry pumps.*

*The aim of the study is to enhance the operational reliability of hydrotransport systems by developing mathematical and optimization models that consider the randomness of wear and performance parameters. Particular attention is given to selecting rational configurations of pump stations and determining system layouts that minimize risks of failure. The methodology integrates monitoring of hydraulic parameters, statistical analysis of wear data, and modeling of component failures.*

*The research results demonstrate that modeling hydroabrasive wear as a stochastic process with independent increments enables more accurate prediction of service life and failure probability. The paper presents analytical expressions for key reliability indicators and illustrates how different system configurations—single-stage, multi-stage, with or without redundancy—impact overall system availability. Optimization techniques, including nonlinear programming and simulation, are applied to determine ideal pump placement and*

*sump volume. The proposed approach offers practical recommendations for maintenance scheduling, spare part management, and cost-effective system design. It is concluded that accounting for stochastic factors significantly enhances system resilience and economic performance in long-term operation.*

**Кобзар Валентин Ігорович** – аспірант кафедри гірничих машин і обладнання, Криворізький національний університет

**Кривенко Олексій Юрійович** – к.т.н., доцент кафедри гірничих машин і обладнання, Криворізький національний університет

**Пікільняк Андрій Валерійович** – к.т.н., доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет

**Valentyn Kobzar** – Postgraduate Student of the Department of Mining Machinery and Equipment, Kryvyi Rih National University.

**Oleksii Kryvenko** – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mining Machinery and Equipment, Kryvyi Rih National University.

**Andrii Pikilniak** – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kryvyi Rih National University.

М.А. Краснюк, Вік.В. Гнатушенко, Б.І. Мороз, О.Р. Сокол

## РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЦЕНТРУ АВТОРИЗАЦІЇ

*Анотація.* У сучасному цифровому світі, де онлайн-сервіси та додатки стають необхідними інструментами в повсякденному житті, питання безпеки та контролю доступу користувачів набувають особливої важливості. Автоматизована система центру авторизації є сервісом що вирішує ці питання. Сервіс забезпечує безпечно та надійне обслуговування клієнтів різних інформаційних систем. Результатом дослідження є створення програмного продукту, послугами якого можуть користуватися як в інфраструктурі сервісів великої компанії, так і WEB-сервісам. Автоматизована система є достатньо швидкою, що дозволяє обслуговувати велику кількість користувачів із різних інформаційних систем одночасно. Використання послуг автоматизованої системи центру авторизації знімає із бізнесу обтяження зі зберігання паролів, авторизації користувачів в інформаційній системі, впровадження безпекових оновлень та полегшує адміністрування.

*Ключові слова:* клієнт, сервер, авторизація, пароль, хеш, Erlang, API, WEB-сервіс, інфраструктура сервісів підприємства.

**Постановка проблеми.** У сучасному цифровому світі, де онлайн-сервіси та застосунки стають необхідними інструментами в повсякденному житті, питання безпеки та контролю доступу набувають особливої важливості. Механізм авторизації є одним з ключових факторів, що забезпечують безпечно та надійне використання цих сервісів.

Головним завданням проведеної роботи була розробка автоматизованої системи здатної до великого інформаційного навантаження. Система повинна була мати підсистеми що слугували середовищем в для адміністрування користувачів бізнесом що є клієнтом автоматизованої системи центру авторизації (надалі AuthHub). При цьому вирішувалося актуальне питання зростаючої потреби в надійній і безпечній авторизації користувачів у світі швидкого технологічного розвитку та зростання загроз у кібербезпеці. Забезпечення безпеки авторизації було і залишається важливим завданням для багатьох організацій та підприємств, які надають свої послуги в Інтернеті, та не тільки. Відсутність ефективної системи авторизації може призвести до витоку конфіденційної інформації, порушення прав доступу, збитків репутаційних та фінансових. Тому важливим питанням було під час проєктування отримати працездатну автоматизовану систему центру авторизації, яка може застосовуватися у різних галузях, забезпечуючи надійний та безпечний доступ до інформації для користувачів.

**Аналіз останніх досліджень.** Одна з ключових задач авторизаційних систем — це забезпечення безпеки інформації, що передбачає захист від несанкціонованого доступу, маніпуляцій з даними та атак типу DDoS (Distributed Denial of Service). У цьому контексті використання сучасних технологій, таких як хмарні інфраструктури, високопродуктивні бази даних і парадигма акторної моделі, стає важливим підходом до вирішення завдань авторизації [3-5]. Авторизація — це процес надання або обмеження доступу до певних ресурсів або функцій системи на основі визначених прав та ролей користувача. Цей механізм відповідає за перевірку того, чи має користувач дозвіл виконувати певні дії або отримувати доступ до конкретної інформації. Авторизація є ключовим етапом у забезпеченні безпеки інформаційних систем, оскільки вона регулює доступ до конфіденційних даних, критичних операцій та обмежує потенційні загрози, пов'язані з несанкціонованим доступом. Метою авторизації є контроль доступу, захист даних, ефективність розподілу прав, безперервності бізнес-процесів [6,7].

Контроль доступу гарантує, що лише уповноважені користувачі отримують доступ до певних ресурсів. Захист даних забезпечує уникнення витоку чи неправильного використання інформації. Ефективний розподіл прав дозволяє гнучко налаштувати ролі для різних категорій користувачів. Захист від несанкціонованих змін або втручання, що можуть вплинути на роботу системи забезпечує безперервність бізнес-процесів [8,9].

Центр авторизації є ключовим елементом сучасних інформаційних систем, який забезпечує контроль доступу до ресурсів на основі політик безпеки. Його роль полягає в забезпеченні безпеки даних і ефективності роботи системи, особливо у високонавантажених середовищах. Він має суттєве значення для ефективності, і зменшує навантаження на інші компоненти інфраструктури, в наслідок чого централізація функцій авторизації звільняє інші елементи системи від необхідності виконувати додаткові перевірки доступу, що підвищує їх продуктивність. Центр авторизації також повинен забезпечувати швидкість обробки запитів. Оптимізовані алгоритми та механізми кешування в центрах авторизації повинні дозволяти обробляти запити користувачів у реальному часі навіть під значним інформаційним навантаженням. Сучасні центри авторизації повинні легко інтегруватися з хмарними платформами, що дозволить масштабувати їхню роботу залежно від зростання кількості користувачів чи ресурсів [10,11].

**Метою роботи** є створення автоматизованої системи центру авторизації, що дозволить бізнес-підприємствам не обтяжувати себе авторизацією користувачів в інформаційній системі за рахунок забезпечення надійності та зручності процесу моніторингу. Програмний продукт повинен бути стійкий до уражень, мати зрозумілий API із функціоналом адміністрування користувачів певної інформаційної системи.

**Основна частина.** Для досягнення мети дослідження в межах проекту auth\_hub була обрана система керування базами даних (СКБД) PostgreSQL для зберігання та управління даними. PostgreSQL є потужною об'єктно-реляційною системою керування базами даних (СКБД), яка надає широкі можливості для зберігання, організації та оптимізації даних. Вона пропонує розширений набір функцій, що включають підтримку

SQL запитів, транзакційності, індексування, виконання збережених процедур, реплікацію даних та багато іншого. Обґрунтування вибору PostgreSQL складається з таких властивостей як надійність, масштабованість, розширені можливості, відкритість та широке використання.

Надійність PostgreSQL підтверджується тим, що вона володіє механізмами забезпечення цілісності даних, відновлення після збоїв та захисту від втрати даних. Це важливо для системи, яка обробляє авторизацію користувачів та зберігає чутливу інформацію. Масштабованість PostgreSQL підтверджена можливістю працювати з великими обсягами даних та високими навантаженнями. Вона підтримує горизонтальне та вертикальне масштабування, що дозволяє розширювати систему під потреби росту обсягів даних та кількості користувачів. Розширені можливості PostgreSQL підтверджується багатим набором функцій та розширень, що дозволяють реалізовувати різноманітні завдання. Вона підтримує розширення SQL, географічні дані, розподілену обробку, повнотекстовий пошук та інші розширені можливості, які можуть бути корисними для реалізації системи авторизації користувачів. PostgreSQL є відкритим програмним забезпеченням з активною спільнотою розробників та користувачів. Це означає наявність безлічі документації, підтримки, патчів та оновлень, що забезпечує стабільність та розвиток системи в майбутньому. Широке використання обумовлено тим, що PostgreSQL є однією з найпопулярніших вільних СКБД, вона використовується багатьма великими компаніями та проєктами. Це означає наявність експертів, готових допомогти з розробкою та підтримкою системи.

Структура розробленої системи складається з підсистем, а кожна підсистема має свої ролі. Коренева підсистема `auth_hub` має простори, тому роль у підсистемі `auth_hub` надається користувачеві саме на простір, а простором є перелік підсистем на які діють ролі підсистеми `auth_hub`. У користувача "admin" за замовченням є ролі адміністратора у всіх просторах підсистеми `auth_hub`. Простір був створений для того, щоб надавати ролі на конкретний простір, а не на всі разом. Щоб користувач отримавши роль не мав змоги маніпуляцій або перегляду даних, що не є в його просторі підсистем. Як висновок можна сказати, що коренева підсистема `auth_hub` має в собі ролі для керування доступом користувачів у сервісі `auth_hub`, тоді коли ролі в інших підсистемах, є інформацією що експортується до інших сервісів клієнтів. Були встановлені наступні обмеження системи:

- неможливість видалення підсистеми `authHub`, навіть при наявності на це ролі;
- неможливість видалення користувача `admin`, навіть при наявності на це ролі;
- неможливість видалення ролі адміністратора "am" із підсистеми "authHub", навіть при наявності на це ролі;
- неможливість забирати роль "am" у користувача `admin` у підсистемі "authHub", просторі "authHub", навіть при наявності на це ролі.

На кожен функціонал є своя роль у підсистемі `authHub`. Перелік усіх ролей підсистеми `authHub` та їх опис зазначено у таблиці 1 (на стан версії сервісу 3.0.0). У таблиці 2 наведено функціонал та перелік ролей, одну з яких необхідно мати для використання функціоналу (на стан версії сервісу 3.0.0).

Ролі підсистеми authHub та їх опис

Роль	Опис
am	AdMin - роль адміністратора. Усі права.
la	Local Admin - роль локального адміністратора. Не має права на видалення та створення підсистем.
si	See Info - роль на перегляд інформації підсистеми: можливі ролі, ролі користувачів у цій підсистемі.
cu	Create Users - роль, що дає право на створення користувачів у системі.
du	Delete Users - роль, що дає право на видалення користувачів із системи.
ar	Add Roles - роль, що дає право на додавання ролей користувачам системи.
rr	Remove Roles - роль, що дає право на вилучення ролей у користувачів системи.
cr	Create Roles - роль, що дає право на створення нових ролей у підсистемі.
dr	Delete Roles - роль, що дає право на видалення ролей у підсистемі.
gr	Get Roles - роль, що дає право на отримання ролей користувача в підсистемі.

Під час авторизації користувача в системі створена сесія на 30 хв, завдяки якій користувач може отримувати доступ до сервісів, що є клієнтами автоматизованої системи центру авторизації auth\_hub. Сервіси клієнти мають свої технічні логіни та паролі, завдяки яким вони взаємодіють з auth\_hub для ідентифікації користувача та отримання його в необхідній підсистемі ролей. У системі auth\_hub реалізовано таймер що видаляє вже не актуальні сесії.

Таблиця 2

Функціонал та ролі для взаємодії із підсистемами

Функціонал API	Ролі
Перегляд інформації про ролі користувачів в підсистемі	am, la, si
Перегляд інформації про ролі в підсистемі	am, la, si
Видалення ролей із підсистеми	am, la, dr
Створення нових ролей в підсистемі	am, la, cr
Видалення підсистеми	am
Створення нової підсистеми	am
Створення нового користувача в системі	am, la, cu
Видалення користувача із системи	am, la, du
Додавання ролей користувачу в підсистемі	am, la, ar
Вилучення ролей у користувача в підсистемі	am, la, rr
Створення сесії	–
Перевірка актуальності сесії	–
Отримання логіну по сесії користувача	–
Отримання ролей сесії користувача	am, la, gr

У даній роботі ми використовували такі архітектури взаємодії: клієнт-сервер та сервер-сервер. Вони є широко використаними моделями в розробці програмного забезпечення, включаючи серверні проєкти та WEB-системи.

У клієнт-серверній архітектурі, клієнти є користувачами або додатками, які взаємодіють з системою та надсилають запити до сервера. Сервери, зі свого боку, обробляють ці запити та забезпечують відповіді клієнтам. Ця модель передбачає розділення обов'язків між клієнтською та серверною стороною, що дозволяє досягти більшої модульності, масштабованості та керованості системи.

Архітектура проєкту побудована на базі акторної моделі, акторна модель є концепцією паралельного програмування, яка використовується в мові програмування Erlang та багатьох інших мовах, і є ключовим аспектом фреймворка OTP. Акторна модель базується на ідеї процесів (акторів), які взаємодіють один з одним шляхом обміну повідомленнями. Кожен актор має свій внутрішній стан і може виконувати певні дії у відповідь на отримані повідомлення. Актори можуть створювати нових акторів, надсилати їм повідомлення і відповідати на отримані повідомлення.

В розробці було визначено ефективним використовувати для супервайзера стратегію `one_for_one`, бо в архітектурі проєкту, воркери супервайзера не мають тісної співпраці між собою. Стратегія `one_for_one` – це коли один з акторів видає аварійну помилку, супервайзер перезапускає цей актор

Важливими аспектами архітектури системи є сторонні сервіси та бібліотеки. Так було обрано Cowboy, який є невеликим, швидким, сучасним HTTP-сервером для Erlang/OTP. Cowboy прагне забезпечити повний стек HTTP в невеликій базі коду. Його оптимізовано для низької затримки та низького використання пам'яті, частково тому, що він використовує двійкові рядки. Також Cowboy надає можливості маршрутизації, вибірково надсилаючи запити обробникам, написаним мовою Erlang. Оскільки для керування з'єднаннями використовується Ranch, Cowboy можна легко вбудувати в будь-яку іншу програму. Cowboy є важливою частиною сервісу, бо завдяки йому реалізується взаємодія із клієнтами та користувачами. Він має в собі пул воркерів які будемо програмувати, та саме завдяки цьому пулу розроблена автоматизована система зможе одночасно обробляти декілька запитів одночасно. Poolboy - це легка загальна бібліотека пулу для Erlang, яка зосереджена на простоті, продуктивності та надійному аварійному відновленні. Він знадобиться у створенні та адмініструванні пулом акторів, що будуть відповідати за взаємодію із базою даних. Пулу було надано назву - `pg_pool`. Важливим є врегулювання кількості акторів у пулах cowboy та `pg_pool`, щоб мінімізувати вузькі місця в архітектурі. Вузьке місце - частина програми, або архітектури що затримує швидкодію усієї системи та навантажувальне тестування необхідно саме для виявлення вузьких місць у системі.

Також під час виконання роботи проведено дослідження алгоритмів хешування паролів. В результаті дослідження прийшли висновку, що будемо використовувати в проєкті для хешування паролів користувачів алгоритм SHA-256 з уповільнювачем PBKDF2.

Розробка структури таблиць бази даних була ключовим етапом у створенні інформаційної системи, від правильної організації таблиць залежить ефективність, масштабованість і продуктивність системи. Кожна таблиця матиме свій Primary Key і завдяки цьому було реалізовано зв'язки між таблицями. В результаті проведених досліджень було визначено, що в схемі треба реалізувати 5 функцій, які дозволяють зменшити обсяг запитів до бази даних, що підвищить швидкодію усієї системи:

1. create\_subsystem(subsystem, description) - створення підсистеми;
2. delete\_allow\_role(subsystem, role) - видалення ролі із підсистеми;
3. delete\_subsystem(subsystem) - видалення підсистеми;
4. delete\_user(login) - видалення клієнта системи.

**Реалізація методу.** Дослідивши різні типи архітектурного стилю API (Application Programming Interface), було зроблено висновок, що для серверної частини автоматизованої системи центру авторизації краще застосовувати архітектурний стиль REST (Representational State Transfer). Причиною обрання REST є те, що центри авторизації зазвичай мають багато клієнтів (вебдодатки, мобільні додатки, сервіси), які взаємодіють із сервером, також REST забезпечує легку інтеграцію для різних клієнтів, і не вимагає складного налаштування та підходить для малих і середніх команд розробників. Також при сумісному його використанні з текстовим форматом JSON (JavaScript Object Notation), забезпечує швидку передачу даних без перевантаження. Крім того, REST це ефективний вибір для реалізації центру авторизації завдяки його простоті, підтримці сучасних стандартів аутентифікації, низьким затратам на впровадження та обслуговування.

Встановлено, що у рамках серверної частини автоматизованої системи центру авторизації, вхідні дані мають бути отримані від користувачів системи та від бази даних при запиті користувача. Взаємодія із користувачами реалізована завдяки архітектурі REST API. Форматом передаваних даних обрана JSON. Таким чином, API сервіс складається із двох компонентів: клієнтське API та адміністративне API.

Для розробки даного продукту було використано ноутбук компанії Dell, із процесором Intel Core i7, відеокартою Intel(R) Xe Graphics (TGL GT2) та з ОЗУ у розмірі 25 Гб, накопичувач SSD обсягом 1 Тб. Вказані технічні засоби не мають бути обов'язково ідентичних характеристик для комфортної розробки системи. Також для розробки системи встановлено і використано такі програмні засоби:

- операційна система Linux Ubuntu 22.04.2 LTS;
- мова Erlang 25.0.4 Ubuntu jammy;
- компілятор Rebar3 з github репозиторію;
- утиліти операційної системи Linux make та git;
- СКБД postgresql;
- інструмент адміністрування баз даних DBeaver;
- платформа для тестування API Postman;
- IDE IntelliJ IDEA.

Для роботи серверної частини даного продукту було використано сервер EC2 орендований у компанії Amazon Web Services (далі AWS), із процесором Intel Core i7, відеокартою Intel(R) Xe Graphics (TGL GT2) та з ОЗУ у розмірі 25 Гб, накопичувач SSD обсягом 1 Тб. База даних була розташована на тому ж хості, що і сервіс auth\_hub. При збільшенні кількості користувачів база даних може бути розміщена на іншому хості.

Вказані технічні засоби не є обов'язковими характеристиками для безперешкодної роботи системи.

Для роботи системи було встановлено і використано на сервері такі програмні засоби:

- операційна система Linux Ubuntu 22.04.2 LTS;
- мова Erlang 25.0.4 Ubuntu jammy;
- компілятор Rebar3 з github репозиторію;
- утиліти операційної системи Linux make та git;
- СКБД postgresql;

Адміністрація та налаштування сервісу була реалізована через консоль завдяки інструменту операційних систем сімейства UNIX - SSH. Слід зазначити, що SSH (Secure Shell) - це криптографічний протокол для безпечного доступу до мережеских пристроїв та серверів. SSH дозволяє адміністраторам і користувачам безпечно взаємодіяти з віддаленими системами через незахищені мережі, шифруючи весь трафік між клієнтом і сервером.

**Висновки.** Результатами проведеної роботи є розроблено програмне забезпечення, яке виконує функції формування та контролю авторизації користувачів. Забезпечення надійності та зручність процесу моніторингу авторизації реалізовано в роботі завдяки спроектованій структурі та архітектурі системи, використанні API сервіс, реалізації функціонала для реєстрації нових користувачів, в тому числі збереження їхніх особистих даних та інформації для авторизації; розробці механізму перевірки автентичності користувачів під час авторизації, використовуючи захищені протоколи та шифрування даних.

Запропоновано ефективну модель збереження та маніпуляції ролей в підсистемах автоматизованої системи центру авторизації на основі механізмів журналювання та моніторингу активності користувачів, що дозволяє виявляти потенційні загрози безпеці.

В подальших дослідженнях необхідно провести аналіз та тестування розробленого сервісу під великим навантаженням, що дозволить збільшити безпечність автоматизованої системи формування та контролю авторизації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Kief Morris. "Infrastructure as Code: Managing Servers in the Cloud." O'Reilly Media, 2016, 362 p.
2. Yevgeniy Brikman. "Terraform: Up & Running: Writing Infrastructure as Code." O'Reilly Media, 2019, 460 p.
3. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами: навч. посіб. / А. М. Сільвестров, М. Я. Островерхов та ін. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 386 с.

4. Обшта А. Ф., Бугаєць В. В. Комплексний алгоритм для системи програмного обслуговування логістики гуманітарних послуг. Комп'ютерні системи та мережі. 2023. Т. 5, № 1. С. 79-88. doi: 10.23939/csn2023.01.079.
5. D. Soldatenko, Vic.Gnatushenko. Study of efficiency of using it-infrastructure-as-a-service for cloud computing / D. Soldatenko, Vic.Gnatushenko // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2(139). – Дніпро, 2022. – С. 68-76 DOI 10.34185/1562-9945-2-139-2022-07
6. Lorin Hochstein, Rene Moser. "Ansible: Upand Running: Automating Configuration Management and Deployment the Easy Way." O'Reilly Media, 2017, 478p.
7. Joe Armstrong. "Programming Erlang: Software for a Concurrent World" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://shop.oreilly.com/product/9781937785536.do>
8. Website "Ukrainian Community of Programmers" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://jobs.dou.ua/salaries/>
9. Francesco Cesarini, Simon Thompson, "Erlang Programming" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://shop.oreilly.com/product/9780596518189.do>.
10. Official documentation website Erlang [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.erlang.org/doc/index.html/>
11. Official documentation website PostgreSQL [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.postgresql.org/>

#### REFERENCES

1. Kief Morris. "Infrastructure as Code: Managing Servers in the Cloud." O'Reilly Media, 2016.
2. Yevgeniy Brikman. "Terraform: Up & Running: Writing Infrastructure as Code." O'Reilly Media, 2019.
3. Modern systems of automatic control of technological complexes: tutorial. / A. Silvestrov, M. Ostroverkhov and oth. – Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2023. 386 p.
4. Obshta, V. Buhaiets. Cross-platform software system for the logistics of humanitarian services. Computer systems and networks. Vol. 5, № 1, 2023. pp. 79-88. doi: 10.23939/csn2023.01.079.
5. D. Soldatenko, Vic.Gnatushenko. Study of efficiency of using it-infrastructure-as-a-service for cloud computing / D. Soldatenko, Vic.Gnatushenko // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2(139). – Дніпро, 2022. – С. 68-76 DOI 10.34185/1562-9945-2-139-2022-07
6. Lorin Hochstein, Rene Moser. "Ansible: Upand Running: Automating Configuration Management and Deployment the Easy Way." O'Reilly Media, 2017.
7. Joe Armstrong. "Programming Erlang: Software for a Concurrent World" [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <http://shop.oreilly.com/product/9781937785536.do>
8. Website "Ukrainian Community of Programmers" [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://jobs.dou.ua/salaries/>
9. Francesco Cesarini, Simon Thompson, "Erlang Programming" [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <http://shop.oreilly.com/product/9780596518189.do>

10. Official documentation website Erlang [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.erlang.org/doc/index.html/>

11. Official documentation website PostgreSQL [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.postgresql.org/>

Received 16.06.2025.

Accepted 20.06.2025.

### ***Development of an automated authorization center system***

*Software has been developed that performs the functions of forming and monitoring user authorization. Ensuring the reliability and convenience of the authorization monitoring process is implemented in the work due to the designed structure and architecture of the system, the use of API service, the implementation of functionality for registering new users, including the storage of their personal data and information for authorization; development of a mechanism for verifying the authenticity of users during authorization using secure protocols and data encryption. An effective model of storing and manipulating roles in the subsystems of the automated system of the authorization center based on the mechanisms of logging and monitoring user activity is proposed, which allows identifying potential security threats.*

**Краснюк Михайло Андрійович** – спеціаліст з розробки програмних засобів, акціонерне товариство комерційний банк «ПРИВАТБАНК»

**Гнатушенко Вікторія Володимирівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

**Мороз Борис Іванович** - доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем.

**Сокол Олександр** - аспірант кафедри інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій.

**Krasnyuk Mykhaylo** - software development specialist, Joint-Stock Company Commercial Bank "PrivatBank".

**Hnatushenko Viktoriia** – Doctor of engineering's sciences, Professor, Head of Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technologies.

**Moroz Boris** – Doctor of engineering's sciences, Professor, Department of Computer Systems and Software, Dnipro University of Technology.

**Sokol Oleksiesander** - postgraduate of Department of Information Technology and Systems, Ukrainian State University of Science and Technologies.

## MACHINE LEARNING METHODS FOR ANTIFRAUD SYSTEMS

*Annotation. Fraud in the financial sector, e-commerce, and online services is becoming increasingly frequent and sophisticated. Traditional rule-based systems, while still helpful in detecting known fraud patterns, struggle to keep up with new, evolving attack vectors, as static rules are quickly circumvented. In contrast, machine learning (ML) provides a dynamic and scalable approach that can process vast amounts of transactional and behavioral data to identify subtle anomalies and suspicious activity.*

*This paper provides a comprehensive overview of current ML techniques used in fraud detection, categorized into three main groups: classification models, anomaly detection methods, and deep learning architectures. It discusses real-world applications across various fraud scenarios, including credit card abuse, account takeovers, cybercrime, and scams in digital commerce.*

*Emphasis is placed on the strengths and limitations of each approach, with attention to real-world considerations like scalability, model transparency, and the challenge of class imbalance. The paper also reviews recent advances, including graph-based representations of financial interactions, IP-based behavioral profiling, and the emergence of hybrid systems that integrate multiple ML techniques – such as combining autoencoders with boosting algorithms for improved accuracy, especially when labeled data is scarce.*

*The findings aim to support the development of flexible, high-performance fraud detection solutions that leverage the most effective ML practices and capitalize on the synergy of hybrid model architectures.*

*Keywords: Fraud detection, machine learning, classification, anomaly detection, neural networks, hybrid approaches.*

**Problem statement.** Fraudsters constantly evolve their methods, complicating the maintenance of traditional rule-based systems and reducing their effectiveness. ML models can adapt to new fraud patterns such as identity theft, account takeovers, and money laundering and scale efficiently with growing data volumes, making them tools for fraud detection.

Fraud takes on many guises, from credit card fraud to account takeovers and online scams. Each form requires a unique strategy for effective detection. Financial fraud often involves unauthorized transactions, identity theft, or money laundering, while cyber and e-commerce fraud may exploit system vulnerabilities and social engineering techniques. With the increasing prevalence of digital banking and authentication-based services, account-related fraud has become a particularly relevant area for specialized strategies.

Recent statistics from the National Bank of Ukraine [1] highlight the evolving nature of payment fraud. Although the number of fraudulent card transactions in Ukraine slightly declined by 1% in 2024 compared to the previous year, the total financial losses caused by such fraud surged by 37%, exceeding 1.1 billion UAH. Furthermore, more than 83% of these fraudulent operations were carried out remotely – often through online purchases, fake service payments, and manipulative schemes such as phishing or social engineering. This ongoing shift toward digital fraud emphasizes the growing importance of behavioral and contextual risk analysis, which cannot be addressed by static rule-based systems alone and requires the implementation of adaptive detection strategies.

Modern fraud detection systems must possess three key attributes: scalability, adaptability, and real-time data processing. ML algorithms enable systems to learn from historical and behavioral data, detect rare events, and continuously improve. One of the most powerful aspects of these algorithms is their ability to uncover hidden correlations, providing a deeper understanding of fraud patterns and tactics. Combined with its adaptability, it ensures that models can quickly respond to evolving fraud tactics.

According to BioCatch [2], over 83% of financial institutions worldwide already use ML to prevent fraud. A prominent example of such technology adoption in large-scale business is the Visa payment system, which is actively developing innovative AI-based solutions, including generative AI [3], a type of AI that can generate new data based on patterns in existing data to counter sophisticated fraud schemes in digital banking.

Therefore, reviewing effective methodologies is essential for understanding the potential directions for developing advanced fraud prevention mechanisms.

**Classification algorithms.** Most financial fraud detection tasks are formulated as binary classification problems (“fraud” vs “normal”). Among classical approaches, logistic regression and decision trees are widely used. Logistic regression is a simple and interpretable model where coefficients can be interpreted as feature weights. However, due to its linear nature, it cannot capture complex, non-linear interactions between features, which limits its effectiveness in detecting sophisticated fraud schemes, such as money laundering or insider trading. Decision trees, in turn, generate explicit “if-then” rules that are easily understandable by experts, but individual trees tend to overfit and generally underperform compared to ensemble methods [4]. In other words, while logistic regression and decision trees are commonly used as baseline models, their performance in complex scenarios is typically inferior to more modern approaches.

Ensemble classifiers are increasingly applied to improve fraud detection accuracy, particularly bagging and boosting methods. A typical example of bagging is the Random Forest (RF), which combines many decision trees. By averaging results across many models, RF achieves better generalization and robustness to noise and outliers in the data. Studies show that RF outperforms individual trees in financial fraud detection tasks [4]. Its drawback lies in relatively low interpretability: explaining results from an ensemble of hundreds of trees can be challenging. On the other hand, gradient boosting methods build a sequence of trees that progressively correct errors from previous iterations, allowing the modeling of highly complex dependencies. Modern boosting implementations, such as XGBoost (Extreme Gradient Boost-

ing), LightGBM (Light Gradient Boosting Machine), and CatBoost (Category Boost), have demonstrated high performance in fraud detection tasks and are well-suited for class imbalance [4].

Specifically, XGBoost has proven effective on highly imbalanced data, which is common in fraudulent transaction detection. Class imbalance refers to the situation where the number of instances of one class is significantly higher than that of the other, making it challenging for the model to learn from the minority class. XGBoost includes built-in mechanisms for class weight compensation [4][8] to address this issue.

In addition to class weighting, oversampling techniques have also been used to improve performance on imbalanced datasets. One of the most widely adopted methods is SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique). SMOTE generates synthetic examples of the minority class by interpolating between existing instances, effectively increasing the diversity of fraudulent samples in the training data. This approach has shown strong results in fraud detection contexts. For instance, in a recent study [5], the combination of RF with SMOTE achieved up to 99.5% accuracy on a dataset with less than 0.2% fraud cases. Similarly, practical applications such as Kaggle models demonstrate that SMOTE significantly increases recall, capturing more fraudulent transactions while maintaining acceptable levels of precision [6]. However, it is essential to apply SMOTE only on the training set to avoid information leakage into the test set.

Other boosting frameworks have their own advantages: LightGBM typically trains faster due to its leafwise growth strategy, while CatBoost can automatically handle categorical features, reducing the need for manual preprocessing. Overall, ensemble methods are currently among the most effective techniques for fraud detection. Their typical limitations include high computational complexity and the black-box nature of model decisions, which can be a challenge in highly regulated financial sectors.

**Anomaly detection algorithms.** In scenarios lacking labeled data or needing to identify previously unknown fraud patterns, anomaly detection methods (unsupervised) are commonly used. These approaches treat fraud cases as statistically rare anomalies that deviate from “normal” transaction profiles. The goal is to model everyday transactions and detect those that do not conform to this pattern. Classic algorithms include Isolation Forest (IF), One-Class Support Vector Machines (SVM), Local Outlier Factor (LOF), and clustering-based methods such as k-means.

IF is a variant of RF specifically adapted to isolate anomalous points: randomly generated trees can quickly separate “unusual” records with outlier feature values. This method scales well to large datasets and has been successfully used for unsupervised fraud detection [8][9]. Researchers report that IF can detect anomalous payment transactions with high accuracy, as indicated by an AUC value of approximately 0.82 on simulated test sets [9].

One-Class SVM constructs a hyperplane that encompasses most normal data and classifies points outside as anomalies. It has been applied in fraud detection, although its performance is sensitive to kernel choice and parameter tuning, and it scales poorly with high-dimensional data. LOF evaluates the local density around each point – transactions with sig-

nificantly lower density compared to neighbors are flagged as potential anomalies. LOF can detect local outliers but has limited scalability due to the computational cost of distance calculations across large datasets.

Clustering methods like k-means, followed by identifying points far from cluster centroids, provide a simple alternative, although the effectiveness of this approach depends on the assumption that normal data form compact clusters, which is not always the case.

Autoencoders, a type of deep neural network trained to reconstruct input data, deserve special attention. When trained only on normal transactions, autoencoders reconstruct anomalous (fraudulent) examples poorly, resulting in a high reconstruction error. By comparing this error to a threshold, suspicious operations can be flagged. Recent studies report the successful use of autoencoders for fraud detection. For instance, work [8] proposes a neural network based on an attention-guided autoencoder combined with a Generative Adversarial Network (GAN), a type of neural network that learns to generate data similar to the training data. This combined model, trained solely on normal data, effectively separated fraudulent records as anomalies, even in highly imbalanced datasets [8].

Another recent study [7] demonstrates that combining an autoencoder with gradient boosting significantly improves detection performance: the autoencoder is used for dimensionality reduction and feature transformation, followed by a LightGBM classifier. The hybrid autoencoders + LightGBM model achieved a recall of ~94.8%, which measures the proportion of actual fraud cases that were correctly identified, significantly outperforming standalone models (with the best alternative recall of around 86%) on the same credit transaction dataset [7]. This approach merges the strengths of unsupervised anomaly detection (the ability to discover novel fraud patterns) with the precision of supervised classification. Similar hybrid architectures have proven effective in other research as well; for instance, XGBOD (Extreme Boosting Outlier Detection), a framework that uses multiple anomaly detectors as feature generators for a gradient boosting model, outperformed single-model baselines in fraud detection benchmarks [6].

In addition to the methods described above, modeling the temporal nature of transactions has proven to be an effective approach for spotting anomalies that unfold over time. Fraudulent activity often shows up as sudden, unexpected changes in how and when transactions occur – patterns that may be missed by models treating each transaction in isolation. To capture such dynamics, Recurrent Neural Networks (RNNs) and their more advanced variant, Long Short-Term Memory (LSTM) networks, have become increasingly popular. These architectures are designed to process sequences of data while preserving context from earlier steps, enabling them to recognize unusual transaction flows that differ from a user's typical usage patterns.

For example, the study [10] demonstrated that using multiple interleaved RNNs to model parallel usage streams (time, device, location) improved fraud detection accuracy while reducing the need for handcrafted features. LSTM networks, in particular, are capable of capturing long-term dependencies in user transaction activity, making them well-suited for identifying subtle shifts in patterns that static models may miss. When combined with attention

mechanisms, these models not only improve accuracy but also enhance interpretability by highlighting the most relevant portions of the transaction sequence.

Thus, anomaly detection techniques, especially when extended with sequence-based neural models, are beneficial for detecting underrepresented or emerging fraud scenarios, especially when labeled data is limited.

**Deep learning and specialized methods.** The growth of data volume and the increasing complexity of fraud schemes have led to the adoption of deep learning. Multilayer neural networks can automatically capture hidden relationships in transactional data. When large historical datasets are available, deep models (feedforward neural networks or recurrent neural networks) often outperform traditional methods in accuracy. In some experiments, deep convolutional neural networks (CNNs) improved fraud detection over tree-based ensembles when applied to large transaction volumes. However, neural networks require careful tuning and longer training times and are susceptible to overfitting on non-representative data.

A cutting-edge direction involves modeling inter-object relationships in financial data through Graph Neural Networks (GNNs). Fraud often involves complex network structures, including links between customers, merchants, devices, or IP addresses. GNNs enable learning directly on graph-structured data, leveraging the interconnectivity of nodes. A recent review [11] demonstrates that GNNs are particularly effective for detecting fraud in financial networks, as they capture hidden patterns of interaction (such as fraudulent transaction rings), significantly outperforming traditional models in accuracy. In real-world systems, GNNs are already used to analyze payment graphs and identify suspicious subgraphs – an approach that would be difficult for models lacking structural awareness.

Another industrial approach involves methods like IP Insights, which are designed to detect IP-based anomalies. For example, Amazon’s IP Insights algorithm is trained unsupervised to learn behavior profiles from historical user-IP pairs and assess the “unlikeliness” of new login attempts [12]. This enables the detection of abnormal behavior – for example, when a user account suddenly has many new IP addresses or logins from unexpected regions, possibly indicating an account compromise.

**Conclusions.** This study provides a foundation for developing effective fraud detection systems utilizing modern ML techniques. It provides an overview of key approaches, from basic classification models and anomaly detection methods to more advanced deep learning architectures. It demonstrates how ML can enable adaptive, scalable, and data-driven solutions in the fight against fraud.

Ensemble classification methods, particularly gradient boosting, remain widely used due to their ability to model complex patterns and handle class imbalance. Anomaly detection techniques, such as autoencoders and IF, help uncover unusual or previously unknown fraud cases without requiring prior data labeling. Deep learning introduces new capabilities, enabling it to detect more complex patterns and account for temporal dependencies in transaction streams.

Specialized approaches such as GNNs and IP-based behavioral profiling open new prospects for detecting fraud embedded in complex relationships or device-level signals. Hybrid

approaches that combine different methods, for example, using autoencoders for feature extraction followed by gradient boosting, have demonstrated high effectiveness on real-world datasets with class imbalance.

Today, the process of fraud detection is increasingly focused on building flexible, intelligent systems that integrate multiple methods while addressing practical concerns such as transparency, fairness, and real-time responsiveness. To stay ahead of emerging threats, these systems must incorporate continuous learning, real-time data stream processing, and human involvement as part of a robust and adaptive defense strategy.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Національний Банк України. Кількість випадків шахрайства з картками знизилася, збитки за ними – зросли. 12.05.2025. URL: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/kilkist-vipadkiv-shahraystva-z-kartkami-znizilasya-zbitki-za-nimi--zrosli> (дата звернення: 16.06.2025).
2. 2024 AI, Fraud, and Financial Crime Survey. URL: <https://www.biocatch.com/ai-fraud-financial-crime-survey> (дата звернення: 14.06.2025).
3. Visa Announces Generative AI-Powered Fraud Solution to Combat Account Attacks. 07.05.2024. URL: <https://investor.visa.com/news/news-details/2024/Visa-Announces-Generative-AI-Powered-Fraud-Solution-to-Combat-Account-Attacks/default.aspx> (дата звернення: 14.06.2025).
4. Big Data-Driven Distributed Machine Learning for Scalable Credit Card Fraud Detection Using PySpark, XGBoost, and CatBoost / Т. Leonidas та ін. *Electronics* 2025. 2025. Т. 14. С. 1754. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14091754>.
5. Optimizing credit card fraud detection with random forests and SMOTE / Р. Sundaravadivel та ін. *Scientific Reports*. 2025. Т. 15. С. 17851. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00873-y>.
6. Applying SMOTE to Fraud Detection. *Kaggle*. URL: <https://www.kaggle.com/code/wuttipats/applying-smote-to-fraud-detection> (дата звернення: 14.06.2025).
7. An AutoEncoder enhanced light gradient boosting machine method for credit card fraud detection / L. Ding та ін. *PeerJ Computer Science*. 2024. Т. 10. С. e2323. URL: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2323> (дата звернення: 15.06.2025).
8. Credit Card Fraud Detection Based on Unsupervised Attentional Anomaly Detection Network / S. Jiang та ін. *Systems*. 2023. Т. 11, № 6. С. 305. URL: <https://doi.org/10.3390/systems11060305> (дата звернення: 15.06.2025).
9. Buschjäger S., Honysz P.-J., Morik K. Randomized outlier detection with trees. *International Journal of Data Science and Analytics*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s41060-020-00238-w> (дата звернення: 15.06.2025).
10. Interleaved Sequence RNNs for Fraud Detection / В. Branco та ін. *KDD '20: The 26th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, м. Virtual Event CA USA. New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3394486.3403361> (дата звернення: 16.06.2025).

11. Graph neural networks for financial fraud detection: a review / D. Cheng та ін. *Frontiers of Computer Science*. 2025. Т. 19, № 9. URL: <https://doi.org/10.1007/s11704-024-40474-y> (дата звернення: 18.06.2025).

12. How IP Insights Works - Amazon SageMaker AI. URL: <https://docs.aws.amazon.com/sagemaker/latest/dg/ip-insights-howitworks.html> (дата звернення: 16.06.2025).

## REFERENCES

1. National Bank of Ukraine. (2025). The number of card fraud cases has decreased, but the losses from them have increased. <https://bank.gov.ua/ua/news/all/kilkist-vipadkiv-shahraystva-z-kartkami-znizilasya-zbitki-za-nimi--zrosli>.

2. *2024 AI Fraud Financial Crime Survey*. (2025). <https://www.biocatch.com/ai-fraud-financial-crime-survey>.

3. Visa Announces Generative AI-Powered Fraud Solution to Combat Account Attacks. (2024). <https://investor.visa.com/news/news-details/2024/Visa-Announces-Generative-AI-Powered-Fraud-Solution-to-Combat-Account-Attacks/default.aspx>.

4. Theodorakopoulos, L., Theodoropoulou, A., Tsimakis, A., & Halkiopoulos, C. (2025). Big Data-Driven Distributed Machine Learning for Scalable Credit Card Fraud Detection Using PySpark, XGBoost, and CatBoost. *Electronics*, *14*(9), 1754. <https://doi.org/10.3390/electronics14091754>.

5. Sundaravadivel, P., Isaac, R., Elangovan, D., KrishnaRaj, D., Rahul, V., & Raja, R. (2025). Optimizing credit card fraud detection with random forests and SMOTE. *Scientific Reports*, *15*, 17851. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00873-y>.

6. *Applying SMOTE to Fraud Detection*. (2023). Kaggle. <https://www.kaggle.com/code/wuttipats/applying-smote-to-fraud-detection>.

7. Ding, L., Liu, L., Wang, Y., Shi, P., & Yu, J. (2024). An AutoEncoder enhanced light gradient boosting machine method for credit card fraud detection. *PeerJ Computer Science*, *10*, Article e2323. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2323>.

8. Jiang, S., Dong, R., Wang, J., & Xia, M. (2023). Credit Card Fraud Detection Based on Unsupervised Attentional Anomaly Detection Network. *Systems*, *11*(6), 305. <https://doi.org/10.3390/systems11060305>.

9. Buschjäger, S., Honysz, P.-J., & Morik, K. (2020). Randomized outlier detection with trees. *International Journal of Data Science and Analytics*. <https://doi.org/10.1007/s41060-020-00238-w>.

10. Branco, B., Abreu, P., Gomes, A. S., Almeida, M. S. C., Ascensão, J. T., & Bizarro, P. (2020). Interleaved Sequence RNNs for Fraud Detection. *У KDD '20: The 26th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3394486.3403361>.

11. Cheng, D., Zou, Y., Xiang, S., & Jiang, C. (2025). Graph neural networks for financial fraud detection: a review. *Frontiers of Computer Science*, *19*(9). <https://doi.org/10.1007/s11704-024-40474-y>.

12. *How IP Insights Works - Amazon SageMaker AI.* (2025).  
<https://docs.aws.amazon.com/sagemaker/latest/dg/ip-insights-howitworks.html>.

Received 18.06.2025.  
Accepted 24.06.2025.

### **Методи машинного навчання для антифрод-систем**

*Анотація. Шахрайство у фінансовому секторі, сфері електронної комерції та онлайн-сервісах стає дедалі частішим і витонченішим. Традиційні системи на основі правил, хоча й залишаються корисними для виявлення відомих шаблонів шахрайства, не встигають за новими, динамічними схемами атак, оскільки статичні правила швидко обходяться зловмисниками. Натомість машинне навчання (МН) пропонує динамічний і масштабований підхід, здатний обробляти великі обсяги транзакційних і поведінкових даних для виявлення тонких аномалій та підозрілої активності.*

*У статті представлено ґрунтовний огляд сучасних методів МН, що застосовуються для виявлення шахрайства. Вони згруповані у три основні категорії: моделі класифікації, методи виявлення аномалій та глибинні архітектури. Розглянуто приклади практичного використання в різноманітних сценаріях шахрайства, зокрема зловживання кредитними картками, перехоплення облікових записів, кіберзлочини та шахрайські дії в цифровій торгівлі.*

*Особливу увагу приділено перевагам і обмеженням кожного підходу з урахуванням таких практичних аспектів, як масштабованість, прозорість моделей і проблема дисбалансу класів. Також проаналізовано останні досягнення у цій сфері, зокрема використання графових представлень фінансових взаємодій, поведінкове профілювання на основі IP-адрес, а також поява гібридних систем, які поєднують декілька методів МН, наприклад, автоенкодера з бустинговими алгоритмами, які використано для підвищення точності, особливо у випадках нестачі розмічених даних.*

*Результати дослідження спрямовані на підтримку розробки гнучких, високоефективних систем виявлення шахрайства, які використовують найкращі практики МН та поєднують переваги гібридної архітектури моделей.*

*Ключові слова: виявлення шахрайства, машинне навчання, класифікація, виявлення аномалій, нейронні мережі, гібридні підходи.*

**Островська Катерина Юріївна** – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

**Носов Валерій Олександрович** – аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

**Ostrovskaya Kateryna Yuriivna** – Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

**Nosov Valerii Oleksandrovyich** – postgraduate student of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

## АНАЛІЗ МЕТОДИК АВТОМАТИЗОВАНОГО КАРТУВАННЯ ЗМІН ВОДОЙМ

*Анотація. Моніторинг внутрішніх вод має стратегічне значення для розвитку країни. Оцінка екологічного стану, об'єм та площа водойм є ключовим у аналізі та прогнозі водного балансу. Внаслідок зміни клімату в Україні відбувається негативний за наслідками процес погіршення умов природного вологозабезпечення, в результаті якого у зоні Полісся зникають території надлишкового зволоження, а на півдні розпочався процес опустелювання земель. Наземні вимірювання з оцінки змін площі водойм є дорогим і ресурсоємним підходом, який особливо складний у віддалених районах. В статті розглянуті основні методи автоматизованого картування змін водойм на основі даних ДЗЗ. Використання різнорідних даних у поєднанні з комбінацією методів на основі спектральних індексів та машинного навчання демонструють найкращий результат. Ключові слова: водні ресурси, водойми, автоматизоване картування, супутниковий моніторинг, методи ДЗЗ, спектральні індекси, машинне навчання*

**Постановка проблеми.** Внутрішні водні ресурси для кожної країни є життєво важливими компонентами водної системи, а їх запас є стратегічним. Озера, річки, водно-болотні угіддя та водосховища є частиною екосистемних послуг у різних країнах світу, які в основному пов'язані з побутовим, промисловим та сільськогосподарським використанням, таким як продукти харчування, електроенергія (гідроенергія), виробництво лікарських речовин та інших матеріалів, а також створення рекреаційних зон [1,2,3,4]. Флора водойм поглинає парникові гази, тоді як невеликі природні водойми та болотисті території захищають ґрунт від ерозії та деградації [4,5]. Зміна клімату та діяльність людини посилили тиск на ці водойми, негативно впливаючи на їх екологічні умови та стан навколишніх екосистем. Кліматичні зміни у поєднанні зі зростаючим попитом на воду ще більше посилюють сезонні та щорічні коливання зі зберігання площі і наповненості водних ресурсів, що потенційно призводить до скорочення або зникнення озер, річок та водно-болотних угідь [2,3]. Гостро постає питання попиту на воду у посушливих та напів-посушливих регіонах [4,5,6]. Особливо вразливими є регіони, які стикаються з нерегулярними опадами, високими темпами евапотранспірації та посухами. Крім того, зростаючий попит на воду, в основному для зрошення, збільшує ризик дефіциту води та загрожує життєздатності населення і ускладнює основні види економічної діяльності.

Дослідження проведені українським Гідрометцентром підтверджують суттєвий вплив зміни клімату на середньорічну температуру повітря. За останні 30 років цей показник підвищився на 1,2°C для всієї території України, а швидкість підвищення є значно вищою порівняно з глобальними та європейськими масштабами. Слід зазначи-

ти, що кількість опадів залишається практично незмінною [5]. У дослідженнях проведених Інститутом водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України при оцінці впливу змін клімату на умови вологозабезпечення території України використовувалась величина кліматичного водного балансу (КВБ), яка характеризує різницю між величиною опадів та потенційним сумарним випаровуванням [5]. Внаслідок зміни клімату в Україні відбувається негативний за наслідками процес погіршення умов природного вологозабезпечення, в результаті якого у зоні Полісся зникають території надлишкового зволоження, а на півдні розпочався процес опустелювання земель. За умови реалізації даного прогнозного сценарію, навіть, при зростанні кількості опадів, кліматичний водний баланс території України до 2050 року може знизитись на 45-115 мм, а його дефіцит в зоні Степу становитиме 560 мм і більше. З урахуванням цього, територія країни з недостатнім рівнем зволоження збільшиться до 56% і лише 28% території будуть відповідати вологим і надмірно вологим умовам [5].

Свій негативний відсоток у прогнозу оцінку вносять активні військові дії, спричинені повномасштабним вторгненням, які призводять до екологічних катастроф. В більшості випадків це навмисне руйнування ворогом інфраструктури, підлив плотин, очисних споруд і водопроводів, що спричиняє затоплення територій із витокami у водойми токсичних речовин та стічних вод. Однією із наймасштабніших екологічних катастроф - є підлив росіянами внутрішніх приміщень Каховської ГЕС, в результаті якого відбувся витік 18.2 кубічних кілометрів води, які затопили величезну територію. Сьогодні територія, яку раніше займало Каховське водосховище, покриває густий ліс, а річка Дніпро повернулася в своє історичне русло. Техногенна катастрофа змінила не тільки стан річки Дніпро, а й ускладнила вирощування сільськогосподарських культур за умови мінімальних водних ресурсів для їх зрошування.

У зв'язку з цим технології, розроблені для виявлення водойм та проведення моніторингу змін їх площі в режимі реального часу на даних супутникового спостереження, мають велике значення.

**Мета дослідження** полягає у визначенні ефективності застосування сучасних методик моніторингу водних ресурсів. Для цього необхідно провести порівняльний аналіз основних методів автоматизованого картування та оцінки динаміки змін водних ресурсів і визначити коло доступних даних, на які можна спиратися.

**Основна частина.** Зростаючий попит на воду та зміна клімату посилюють проблеми управління водними ресурсами в посушливих та напівпосушливих регіонах, які відчувають дефіцит води внаслідок низьких і нерегулярних опадів та високої евапотранспірації. Моніторинг внутрішніх вод має стратегічне значення для розвитку країни. Оцінка екологічного стану, об'єм та площа водойм є ключовим у аналізі та прогнозі водного балансу і просторовому розподілі серед регіонів. Особливу актуальність набуває моніторинг водойм у країнах які найбільше потерпають від стрімких змін клімату. Ці аспекти є вирішальними для оцінки їх довгострокової здатності підтримувати різні види використання води відповідно до цілей сталого розвитку (ЦСР) [7,8]. Наземні вимірювання з оцінки змін площі водних об'єктів є дорогим і ресурсоємним підходом, який особливо складний у віддалених районах та при оцінці сукупності невеликих во-

дойм. В свою чергу дистанційне зондування забезпечує економічно ефективну альтернативу, покращуючи існуючі системи моніторингу, та зменшуючи залежність від дорогих наземних обстежень, які в умовах активних військових дій, неможливі. Пропонуючи просторові та часові спостереження з високою роздільною здатністю зі збільшенням точності, дистанційне зондування значно покращує оцінку та управління водоймами [6,7].

Використання даних дистанційного зондування для моніторингу та картографування водойм значно розвинулось за останні роки, одним із чинників, який сприяє цьому процесу - доступність супутникових даних різної роздільної здатності та їх періодичність. Науковці використовують різноманітні методи комбінуючи різнорідні дані з активних та пасивних датчиків зйомки [11,12,13]. У перших дослідженнях моніторингу поверхневих вод використовували зображення Landsat, які доступні в архівах даних з 1970-х років [10,14,15]. З 8-денним покриттям та роздільною здатністю 30 м при умові відсутності хмарності, Landsat забезпечує довгостроковий моніторинг. Основною проблемою даних середньої просторової роздільної здатності, є точність ідентифікації визначення кордону між водою та сушею, що призводить до значних похибок. Запущена пізніше місія MODIS, зробили свій значний внесок у довгостроковий моніторинг поверхневих вод [16,17]. Основна перевага даних MODIS - щоденне глобальне покриття та відкритість даних, через низьку просторову роздільну здатність значно зменшується можливість ідентифікації та виявлення водойм, особливо невеликих озер та річок [11,13]. MODIS, і Landsat є пасивними оптичними датчиками, які фіксують відбите сонячне світло і теплове випромінювання з поверхні Землі. Вони працюють у видимих, ближніх інфрачервоних, короткохвильових інфрачервоних та теплових інфрачервоних областях електромагнітного спектру, щоб забезпечити зображення придатні для візуальної інтерпретації. Однак вони обмежені погодними умовами, зокрема покриттям хмарністю.

Радарні супутникові датчики, зокрема радар з синтетичною діафрагмою (SAR), пропонують можливість отримувати дані вдень і вночі, забезпечуючи безперервний моніторинг незалежно від погодних умов. Їх зображення з високою роздільною здатністю забезпечують широке покриття, швидке сканування та можливість детального моніторингу невеликих об'єктів. Радіолокаційні зображення часто менш інтуїтивно зрозумілі для візуальної інтерпретації через відсутність кольорової інформації та надмірну чутливість, включаючи перешкоди. Все частіше вчені з спостереження Землі інтегрують оптичні та радіолокаційні дані для покращення аналізу, що призводить до більш точної класифікації земельного покриття, покращення моніторингу навколишнього середовища та більш обґрунтованого прийняття рішень у різних сферах.

Sentinel-1 і Sentinel-2 - це дві сім'ї супутників з програми Copernicus Європейського космічного агентства (ESA). Разом ці місії пропонують оптичні зображення з високою роздільною здатністю з видимих, ближніх інфрачервоних (NIR) та короткохвильових інфрачервоних (SWIR) частин спектру, а також технологію радара з синтетичною

діафрагмою (SAR). У поєднанні з інноваційними методами картографування зображення Sentinel пропонують нові можливості для точного виявлення та моніторингу водойм.

Методології картографування водних об'єктів значно розвинулися з підвищенням роздільної здатності супутникових даних, що дозволяє застосовувати методи дистанційного зондування для великих і маленьких водойм, охоплюючи регіони країни.

Більшість досліджень побудовані на використанні спектральних індексів NDWI та Modified NDWI (MNDWI) [12,14]. Один із спектральних індексів, що широко використовується та дозволяє проводити моніторинг змін площі водного дзеркала у водоймах – Normalized Difference Water Index (NDWI). Оскільки водойми сильно поглинають світло у видимому та інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектра, NDWI використовує зелені та ближні інфрачервоні смуги для виділення водойм. Він чутливий до присутності міської забудови та може призводити до переоцінки площ водних об'єктів. Значення індексу понад 0.5 зазвичай відповідає водоймам. Рослинність, як правило, має значно менші значення, а забудовані території — значення в діапазоні від 0 до 0.2.

Індекс NDWI розраховується за формулою:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR), \quad (1)$$

де NIR – коефіцієнти відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру, Green – у зеленому.

Свій розвиток отримав модифікований нормалізований різницевий водний індекс (MNDWI), через більш точне виділення водних об'єктів на супутникових знімках, ніж стандартний NDWI [12,14]. Індекс MNDWI розраховується за формулою:

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR), \quad (2)$$

де SWIR - коефіцієнти відбиття у короткохвильовому інфрачервоному спектрі, Green – у зеленому.

Використання SWIR при розрахунку спектрального індексу MNDWI, дозволяє зменшити вплив рослинності та інших поверхонь, які також можуть відображати у NIR, та покращити виявлення водних об'єктів. Значення MNDWI перебувають у діапазоні від -1 до 1, де понад 0.5 зазвичай відповідають водоймам.

Окреме використання спектральних індексів для аналізу змін водойм за багаторічний період не дає повної інформації. Свій подальший розвиток моніторингу поверхневих вод набули дослідження з використанням алгоритмів класифікації Random Forest та Artificial Neural Networks [18]. Використання методів машинного навчання для моніторингу стану водних об'єктів на основі оптичних та радарних супутникових знімків дозволяє автоматизувати процеси аналізу та надавати більш точні, що важливо для прийняття обґрунтованих рішень. У дослідженні [19] на основі даних Sentinel-1 та Sentinel-2 з використанням згорткової нейронної мережі були розроблені інструменти для картографування та оцінки динаміки змін поверхневих водних об'єктів.

Іншим підходом, який був широко вивчений - це методи пороговання зображень, включаючи метод Оцу [20]. Метод Оцу продемонстрував ефективність серед методів порогового значення, перевершуючи більшою точністю при виявленні водних об'єктів. Простота та ефективність порогового підходу Оцу скорочує час обробки, зберігаючи точність у порівнянні з методами класифікації. Метод Оцу починається з сегментації зображення шляхом аналізу розподілу інтенсивності пікселів, а потім визначає оптимальний поріг, який максимізує дисперсію між об'єктом та класами фону, що призводить до бінарної сегментації зображення. Цей метод особливо ефективний у зображеннях SAR, де варіації у відтінках сірого відповідають мікрохвильовим відмінностям зворотного розсіювання у воді, рослинності та ґрунті.

Однак такі методи не дозволяють отримати правильне порогове значення коефіцієнта зворотного розсіювання для відносно невеликих водойм. У роботі [21] представлено метод картографування поверхні водойм, який дозволяє правильно ідентифікувати водойми навіть у ситуаціях дисбалансу класів «вода»/«суша». Метод працює за принципом максимальної відповідності отриманої маски води SAR заданій еталонній масці. Таким чином, метод дозволяє дослідити можливості пошуку та вибору оптимальних параметрів (поляризація та спекл-фільтрація), які забезпечують максимальну якість маски води SAR. За наявності опорної маски води запропонований метод є точнішим, ніж метод Оцу.

**Висновки.** Розглянуто методи автоматизованого картування із застосування дистанційного моніторингу та применимость методів для аналізу водних ресурсів України. Визначено основні чинники, які спричиняють зневоднення та зникнення водойм.

Проаналізовано методи моніторингу поверхневих вод на основі супутникових даних. Основні класичні методи базуються на використанні спектральних індексів, машинного навчання та пороговання зображень. Застосування різномірних даних у поєднанні з комбінацією методів демонструють найкращий результат. Слід зазначити що такі методи не дозволяють отримати точне порогове значення для відносно невеликих водойм. Метод картування поверхневих вод із застосуванням радарних зображень та використанням методу вибору оптимального порогу, еталонної маски води, показав найкращий результат.

Подальші дослідження будуть присвячені розробці комплексної методології картування та аналізу водойм із залученням машинного навчання та різномірних даних.

#### **ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES**

1. Biemans, H.; Haddeland, I.; Kabat, P.; Ludwig, F.; Hutjes, R.W.A.; Heinke, J.; von Bloh, W.; Gerten, D. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resour. Res.* 2011, 47. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Haines-Young, R.; Potschin, M. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1; Technical Report; Fabis Consulting Ltd.: Nottingham, UK, 2018. [Google Scholar]

3. Grizzetti, B.; Lanzanova, D.; Liquete, C.; Reynaud, A.; Cardoso, A. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ. Sci. Policy* 2016, 61, 194–203. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Shaad, K.; Souter, N.J.; Vollmer, D.; Regan, H.M.; Bezerra, M.O. Integrating Ecosystem Services Into Water Resource Management: An Indicator-Based Approach. *Environ. Manag.* 2022, 69, 752–767. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. Аналітичні матеріали, наукові прогнози та пропозиції НААН щодо переліку заходів, реалізація яких сприятиме забезпеченню водної та продовольчої безпеки України в умовах змін клімату URL: <http://naas.gov.ua/slide/v-umovakh-suchasnikh-zm-n-kl-matu-r-ven-zvolozhennya-na-teritor-ukra-ni-golovnim-chinnikom-yakiy-obm/#:~:text=%D0%92%D0%B6%D0%B5%20%D0%B2%20%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D1%87%D0%B0%D1%81%20%D0%BD%D0%B0,%E2%80%94%D0%B2%D1%96%D0%B4%20%20%D0%B4%D0%BE%2050%25>. (дата звернення: 11.04.2025).
6. Aguirre, I.; Lozano-Parra, J.; Garrido Velarde, J. Reservoir time-series filling from remote sensing data in the Central Valley, Chile. In *Analyzing Sustainability in Peripheral, Ultra-Peripheral, and Low-Density Regions*; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2022; pp. 117–130. [Google Scholar]
7. Liu, J.; Jiang, L.; Zhang, X.; Druce, D.; Kittel, C.M.M.; Tøttrup, C.; Bauer-Gottwein, P. Impacts of water-resources management on land-water storage in the North China Plain. *J. Hydrol.* 2021, 603 Pt C, 126933. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Vörösmarty, C.; McIntyre, P.; Gessner, M.; Dudgeon, D.; Prusevich, A.; Green, P.; Glidden, S.; Bunn, S.E.; Sullivan, C.A.; Liermann, C.R.; et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 2010, 467, 555–561. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Peng, J.; Liu, S.; Lu, W.; Liu, M.; Feng, S.; Cong, P. Continuous Change Mapping to Understand Wetland Quantity and Quality Evolution and Driving Forces: A Case Study in the Liao River Estuary from 1986 to 2018. *Remote Sens.* 2021, 13, 4900. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Yao, F.; Wang, J.; Wang, C.; Crétaux, J.-F. Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 2019, 232, 111210. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Deng, X.; Song, C.; Liu, K.; Ke, L.; Zhang, W.; Ma, R.; Zhu, J.; Wu, Q. Remote-sensing estimation of catchment-scale reservoir water impoundment in the upper Yellow River. *J. Hydrol.* 2020, 585, 124791. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Di Francesco, S.; Casadei, S.; Di Mella, I.; Giannone, F. The role of small reservoirs in a water-scarcity scenario: A computational approach. *Water Resour. Manag.* 2022, 36, 875–889. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Shi, J.; Hu, C. Evaluation of ECOSTRESS thermal data over South Florida estuaries. *Sensors* 2021, 21, 4341. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

14. Condeça, J.; Nascimento, J.; Barreiras, N. Monitoring the storage volume of water reservoirs using Google Earth Engine. *Water Resour. Res.* 2022, 58, e2021WR030026. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Pekel, J.F.; Cottam, A.; Gorelick, N. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 2016, 540, 418–422. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Gao, H.; Birkett, C.; Lettenmaier, D.P. Global monitoring of large-reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resour. Res.* 2012, 48. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Khandelwal, A.; Karpatne, A.; Marlier, M.E.; Kim, J.; Lettenmaier, D.P.; Kumar, V. An approach for global monitoring of surface-water-extent variations in reservoirs using MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 2017, 202, 113–128. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Ghansah, B.; Foster, T.; Higginbottom, T.P.; Adhikari, R.; Zwart, S.J. Monitoring spatial-temporal variations of surface areas of small reservoirs in Ghana. *Phys. Chem. Earth* 2022, 125, 103082. [Google Scholar] [CrossRef]
19. K Sergieieva, O Kavats, V Vasyliov, Y Kavats, O Kovro, Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proceedings*, 2024, V3790, «Information Control Systems & Technologies 2024., p. 422–434.
20. Tan, J.; Tang, Y.; Liu, B.; Zhao, G.; Mu, Y.; Sun, M.; Wang, B. A self-adaptive thresholding approach for automatic water extraction using Sentinel-1 SAR imagery. *Remote Sens.* 2023, 15, 2690. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Kavats, O., Khramov, D., & Sergieieva, K. (2022). Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water*, 14(24), 4030, DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244030>.

Received 18.06.2025.

Accepted 24.06.2025.

### ***Analysis of automated mapping techniques for changes in water bodies***

*Inland water resources are vital components of the water system for every country, and their supply is strategic. Growing demand for water and climate change are exacerbating water management problems in arid and semi-arid regions, which experience water shortages due to low and irregular rainfall and high evapotranspiration. Monitoring inland waters is of strategic importance for a country's development. Assessing the ecological status, volume and area of water bodies is key to analysing and forecasting the water balance and spatial distribution among regions. Monitoring water bodies is particularly relevant in countries most affected by rapid climate change. As a result of climate change in Ukraine, there is a negative process of deterioration of natural moisture conditions, as a result of which areas of excessive moisture are disappearing in the Polissya zone, and the process of desertification has begun in the south. Ground-based measurements to assess changes in the area of water bodies are an expensive and resource-intensive approach, which is particularly difficult in remote areas. The article discusses the main methods of automated mapping of changes in water bodies using remote sensing data. The use of heterogeneous data in combination with a combination of methods based on spectral indices and machine learning demonstrates the*

*best results. The article discusses automated mapping methods using remote monitoring and the applicability of these methods for analysing water resources in Ukraine. The main classical methods are based on the use of spectral indices, machine learning and image thresholding. The use of heterogeneous data in combination with a combination of methods demonstrates the best results. It should be noted that such methods do not allow obtaining an accurate threshold value for relatively small water bodies. The method of mapping surface waters using radar images and the method of selecting the optimal threshold, the reference water mask, showed the best results.*

*Keywords: water resources, water bodies, automated mapping, satellite monitoring, remote sensing methods, spectral indices, machine learning*

**Кавац Олена Олександрівна** — к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

**Кавац Юрій Віталійович** — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

**Сергєєва Катерина Леонідівна** — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

**Рой Дмитро Миколаєвич** — аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

**Kavats Olena Oleksandrivna** — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

**Kavats Yurii Vitaliiovich** — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

**Kateryna Sergieieva** — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Computer Engineering of Dnipro University of Technology.

**Roi Dmytro** — graduate student of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗКРОЮ ЛИСТОВОГО ПАПЕРУ ДЛЯ ПОТРЕБ ПОЛІГРАФІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

*Анотація.* У статті представлено концепцію, архітектуру та принципи реалізації інформаційного модуля підтримки прийняття рішень (ІМ ППР) для технолога поліграфічного підприємства. Модуль розроблено з метою автоматизації процесів підготовки до друку, вибору оптимальних параметрів розкрою, призначення матеріалів і вибору технологічного маршруту. Запропоноване рішення поєднує математичні моделі, виробничі дані та евристичні правила з практики, що дозволяє зменшити час прийняття рішень та знизити ймовірність помилок.

*Ключові слова:* підтримка прийняття рішень, поліграфія, технолог, виробниче планування, розкрій, інформаційна система, оптимізація.

**Постановка проблеми.** Основна тенденція розвитку сучасної поліграфії – інтерактивні друкарні – це застосування інтерактивної взаємодії між споживачем та власником інформації. Відкрита додрукарська система підтримує функції інтерактивного зв'язку з замовником та персоналізування продукції. Умовно технологічний процес додрукарської підготовки видання можна поділити на три основні етапи:

- 1) підготовка та введення інформації у комп'ютерну видавничу систему (автором, видавництвом або друкарнею);
- 2) створення електронного макету видання;
- 3) підготовка (нормалізування файлів, трепінг, спуск сторінок, растрівання, отримання проби) та виведення сторінок на матеріальний носій (папір, фотоплівку, формну пластину або циліндр машини).

Впровадження автоматизованих рішень для оптимізації видавничого процесу значно підвищує рівень оперативності додрукарської підготовки, що особливо актуально при підготовці листкової продукції (етикеток, рекламних постерів та інш.).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Процес розкрою паперу у поліграфічному виробництві є ключовим етапом, що впливає на собівартість продукції, витрати матеріалів та логістику виробництва. Через варіативність замовлень та технологічних обмежень виникає потреба в автоматизованій підтримці прийняття рішень. Інформаційні системи, які поєднують моделі оптимізації та сучасні інтерфейси користувача, можуть значно покращити якість виробничого планування. Ефективним інструментом для оптимізації поліграфічних процесів є математичне моделювання задачі розкрою паперу.

Розкрій паперу — одна з критичних технологічних операцій у поліграфічному виробництві. Неefективний розкрій призводить до перевитрати матеріалу та збільшення виробничих витрат. Задача розкрою має комбінаторний характер і належить до NP-складних задач, що ускладнює її розв'язання для великих обсягів вхідних даних. Використання алгоритмів розміщення з урахуванням виробничих обмежень дозволяє мінімізувати відходи, підвищити продуктивність та забезпечити гнучке планування у типографії.

Задача промислового розкрою паперу для друку листової продукції відноситься до класу завдань двовимірного (2D) прямокутного розкрою. Зважаючи на складність цього завдання широко використовуються евристичні алгоритми рішення. Поява та розвиток імовірнісних методів локального пошуку оптимуму призвело до розробки алгоритмів, які є декодерами в багатопрохідних алгоритмах.

По суті, розміщення прямокутників зводиться до їх укладання, коли вони не мають перетинів. Більшість точних методів рішення зводиться до перебору множини допустимих рішень і знаходження серед них оптимуму.

Для розв'язання задачі можна застосовувати:

- жадібні алгоритми (greedy methods) для швидкого знаходження прийнятних рішень;
- евристичні методи, зокрема генетичні алгоритми, для наближеного пошуку оптимального рішення;
- методи динамічного програмування для випадків з обмеженою кількістю варіантів.

Технолог поліграфічного підприємства відповідає за підготовку виробництва: вибір формату паперу, планування розкрою, визначення технологічних режимів. У сучасних умовах значного потоку замовлень, їхньої варіативності та стислих термінів, виникає потреба в автоматизованій підтримці прийняття рішень (ППР). Інформаційні модулі, інтегровані в загальну систему управління виробництвом, дозволяють оперативно формувати обґрунтовані рішення.

**Мета дослідження.** Основною метою є створення математичного ядра для інформаційного модуля, який:

- підтримує технолога у виборі схеми розкрою, формату, матеріалу;
- виконує автоматичні розрахунки витрат матеріалів;
- дозволяє оцінювати ефективність різних варіантів планування;
- інтегрується з ERP/MES-системами підприємства.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Математична постановка задачі двовимірного (2D) прямокутного розкрою формулюється наступним чином.

Нехай задано:

- набір форматів друкованої продукції  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ , кожен з яких має ширину  $w_i$  та висоту  $h_i$ ;
- наявний стандартний листовий формат паперу  $W \times H$ ;
- обсяги замовлень  $q_i$  для кожного формату  $F_i$ .

Задача розкрою:

знайти таке розміщення  $F_i$  на листах  $W \times H$  яке мінімізує:

- загальну кількість використаних аркушів  $N$ ,
- сумарну площу відходів  $S_{\text{відх}}$ .

Тобто

$$\min N, \min S_{\text{відх}} = \sum_{j=1}^N (W \cdot H - \sum_i n_{ji} \cdot w_i \cdot h_i), \quad (1)$$

де  $n_{ji}$  - кількість виробів  $i$ -го типу на  $j$ -му аркуші.

При обмеженнях:

- кожен аркуш не перевищує розміри  $W \times H$ ;
- сумарна кількість виробів  $i$ -го типу повинна дорівнювати  $q_i$ , або  $\sum_j n_{ji} \geq q_i$ ,

для всіх  $i$ ;

- допустиме розміщення без перекриття.

Пропонуємо для розв'язання задачі розкрою (1) застосувати евристичний метод, що відноситься до класу задач про пакування рюкзака або планування рейсів для складських штабелерів з бортовим накопичувачем. Але ці методи вирішують одновимірну задачу пакування. Запропонований метод базується на послідовному розташуванні прямокутників, починаючи з пуского аркушу. Завдяки тому, що друк здійснюється партіями по  $Q = 500 - 5000$  листів, відповідно технологічного обладнання, то тираж можна перерахувати відносно цієї величини.

По перш за все необхідно відсортувати всі замовлення на друк із зменшенням значення критерію відбору виду

$$ST_i = S_i g_i, \quad (2)$$

де  $S_i = w_i h_i$  - площа  $i$ -го формату друкованої продукції;  $q_i$  - обсяги замовлень (тираж) для кожного формату  $F_i$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Другим кроком є визначення номера формату  $k$ , який має максимальне значення критерію (2), та розташуємо першій формат на листі. Для цього необхідно зробити аналіз відносних розмірів для визначення варіанту укладки за формулами

$$W_{wk} = \frac{W}{w_k}, W_{hk} = \frac{W}{h_k}, H_{wk} = \frac{H}{w_k}, H_{hk} = \frac{H}{h_k}. \quad (3)$$

Обраховуємо коефіцієнти для визначення варіантів укладки (горизонтальне (4) або вертикальне (5) розташування) наступним чином

$$k_{w1} = W - w_k \cdot \text{int}(W_{wk}), k_{h1} = H - h_k \cdot \text{int}(H_{hk}), \quad (4)$$

$$k_{w2} = W - h_k \cdot \text{int}(W_{hk}), k_{h2} = H - w_k \cdot \text{int}(H_{wk}), \quad (5)$$

В залежності від значень отриманих коефіцієнтів визначаються геометричні розміри вільних зон листа після розташування першого формату. А саме можливі чотири варіанти мінімальних значень коефіцієнтів:

1) при  $k_{w1} = \min$  -

$$W1 := W, H1 := k_{h1};$$

2) при  $k_{h1} = \min$  -

$$W1 := k_{w1}, H1 := H;$$

1) при  $k_{w2} = \min$  -

$$W1 := W, H1 := k_{h2};$$

1) при  $k_{w1} = \min$  -

$$W1 := k_{w2}, H1 := H.$$

$W1$  та  $H1$  - нові розміри залишків листа.

Після цього здійснюється корекція списку обсягу замовлень (зменшується з урахуванням розташованого формату). Та дії повторюються за алгоритмом, починаючи з сортуванням оновленого списку.

Якщо на лист, що заповнюється, не можна додати щось зі списку заказів, то він вважається закритим, зберігається у переліку сформованих листів, та відкривається новий лист для подальшого розкрою.

При застосуванні належного математичного апарату в управлінні поліграфічними процесами можна забезпечити гнучке, адаптивне та обґрунтоване прийняття рішень у сфері управління розкромом паперу.

Інформаційний модуль підтримки прийняття рішень має значно підвищити ефективність та точність роботи технолога типографії. Надалі планується розширити функціональність системи за рахунок машинного навчання для прогнозування витрат, аналізу попередніх рішень та динамічної адаптації до змін у виробничому середовищі.

Інформаційна СППР має бути побудована за модульним принципом та включати такі основні компоненти:

- База даних: зберігання інформації про доступні формати паперу, замовлення, параметри обладнання.

- Модуль математичного моделювання: реалізація алгоритмів оптимального розміщення друкованих елементів на аркушах.

- Аналітичний модуль: оцінка ефективності розкрою (відсоток використання площі, відходи, кількість аркушів).

- Інтерфейс користувача: візуалізація схеми розкрою, можливість ручного редагування, інтеграція з ERP-системами.

Подальший розвиток системи передбачає інтеграцію з системами обліку матеріалів, прогнозування потреб та навчання моделей на історичних даних.

Доцільно використати генетичний алгоритм, що дозволить ефективно вирішувати задачу розкрою паперу в умовах варіативного виробництва. Поєднання математичної моделі з еволюційними принципами пошуку забезпечує гнучкість, масштабованість та адаптивність системи оптимізації. У перспективі планується інтеграція алгоритму в інформаційні системи управління виробництвом.

**Висновки.** Інформаційний модуль підтримки прийняття рішень значно підвищує ефективність та точність роботи технолога типографії. Надалі планується розширити функціональність системи за рахунок машинного навчання для прогнозування витрат, аналізу попередніх рішень та динамічної адаптації до змін у виробничому середовищі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Йордан Г. Основи поліграфії : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / Ганна Йордан ; [за ред. д-ра тех. наук, проф. С. Гавенко]. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2007. – 176 с.
2. Предко Л. С. Проектування до друкарських процесів : навч. посіб. / Л. С. Предко. – Львів : УАД, 2009. – 352 с.
3. Канторович Л. В. Рациональный раскрой промышленных материалов / Л. В. Канторович, В. А. Залгаллер. – Новосибирск: Наука, 1971. – 300 с.
4. Dyckhoff, H. Cutting and Packing in Production and Distributing / H. Dyckhoff, U. Finke. – Heidelberg : Physica Verlag, 1992. – 248 p.
5. Dyckhoff, H. A Typology of cutting and packing problems / H. Dyckhoff // European J. of Operational Research. 1990. Vol. 44. P. 145-159.
6. Diana S. An Improved Genetic Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem / S. Diana, A. K. Pundir. // International Journal of Computer Applications. – 2013. – №78. – pp. 34–39.
7. Hartmann S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling / Hartmann. // Naval Research Logistics. – 1998. – №45. – pp. 733–750.

#### REFERENCES

1. Yordan G. Osnovi poligrafii : navch. posib. [dlya stud. visch. navch. zakl.] / Ganna Yordan ; [za red. d-ra teh. nauk, prof. S. Gavenko]. – Ternopil : Pidruchniki i posibniki, 2007. – 176 s.
2. Predko L. S. Proektuvannya do drukarskih protsesiv : navch. posib. / L. S. Predko. – Lviv : UAD, 2009. – 352 s.
3. Kantorovich L. V. Ratsionalnyi raskroy promyishlennyih materialov / L. V. Kantorovich, V. A. Zalgaller. – Novosibirsk: Nauka, 1971. – 300 s.
4. Dyckhoff, H. Cutting and Packing in Production and Distributing / H. Dyckhoff, U. Finke. – Heidelberg : Physica Verlag, 1992. – 248 p.
5. Dyckhoff, H. A Typology of cutting and packing problems / H. Dyckhoff // European J. of Operational Research. 1990. Vol. 44. P. 145-159.

6. Diana S. An Improved Genetic Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem / S. Diana, A. K. Pundir. // International Journal of Computer Applications. – 2013. – №78. – pp. 34–39.
7. Hartmann S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling / Hartmann. // Naval Research Logistics. – 1998. – №45. – pp. 733–750.

Received 23.06.2025.

Accepted 26.06.2025.

### ***Optimization of sheet paper cutting for the needs of printing production***

*The article presents the concept, architecture and principles of implementation of the information module for decision support (IM PPR) for the technologist of a printing enterprise. The module was developed to automate the processes of preparation for printing, selection of optimal cutting parameters, assignment of materials and selection of a technological route. The proposed solution combines mathematical models, production data and heuristic rules from practice, which allows to reduce decision-making time and reduce the probability of errors.*

*Keywords: decision support, printing, technologist, production planning, cutting, information system, optimization.*

**Клевцов Микита Костянтинович** – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

**Рудакова Ганна Володимирівна** – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

**Klevtsov Mykyta Kostiantynovych** - postgraduate student at the department of automation, robotics and mechatronics of Kherson National Technical University.

**Rudakova Hanna** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ  
ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ**

*Анотація.* У статті наведено результати експериментальних досліджень процесу ущільнення полістиролбетонної суміші за допомогою спеціально розробленої комбінованої імпульсно-вібраційної установки. Актуальність дослідження пов'язана з необхідністю підвищення щільності та міцності легкобетонних виробів шляхом удосконалення технології ущільнення. Метою роботи є встановлення ефективних параметрів ущільнення (зазору між рамами, маси привантажувача та тривалості дії) та оцінка впливу горизонтальних коливань на міцність виробів. Методами дослідження виступили планування експерименту, фізичне моделювання, а також обробка результатів із побудовою поверхонь відгуку. Встановлено, що застосування комбінованого навантаження дозволяє підвищити межу міцності на стиск до 5–7% у порівнянні з традиційним імпульсним ущільненням. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних параметрів виробництва стінових виробів із полістиролбетону.

*Ключові слова:* полістиролбетон, імпульсно-вібраційне ущільнення, комбіновані коливання, лабораторна установка, привантажувач, міцність на стиск, зазор, тривалість ущільнення, експеримент, поверхня відгуку.

**Постановка проблеми.** Одним із ключових чинників, що впливає на якість легкобетонних виробів, є ефективність процесу ущільнення, який визначає щільність, міцність та однорідність сформованої структури. У традиційних технологіях ущільнення легких бетонів недостатньо враховується вплив специфіки легких заповнювачів, зокрема полістирольних гранул, які мають низьку густину, високу деформативність та значну здатність до амортизації дії зусиль. Це обмежує ефективність звичайних вібраційних методів ущільнення, особливо в умовах складної геометрії або обмеженого часу формування виробів. Крім того, наявність замкнених повітряних включень та неоднорідність розподілу наповнювача знижують експлуатаційні характеристики матеріалу. Вирішенням проблеми може бути застосування комбінованої дії вертикальних імпульсних та горизонтальних вібраційних навантажень, що дозволяє активізувати реологічні властивості суміші, забезпечити ефективне витіснення повітря і рівномірне ущільнення.

**Аналіз останніх досліджень.** Останні дослідження у сфері вдосконалення процесів ущільнення легких бетонів акцентують увагу на необхідності впровадження нових методів збудження суміші, які враховують особливості легких заповнювачів та високі

вимоги до однорідності й щільності виробів. У працях [1–4] доведено ефективність імпульсного навантаження, що забезпечує покращене ущільнення за рахунок короткочасного, але інтенсивного впливу, який створює більш рівномірний тиск у тілі бетонної суміші. Результати експериментів [2, 5, 7] показують, що поєднання вертикальних імпульсів із горизонтальними вібраціями сприяє активному витісненню повітряних включень, формуванню щільної структури та зменшенню кількості дефектів. У роботах [3, 6] розвивається підхід до опису процесу ущільнення як взаємодії масово-пружинної системи, що дозволяє враховувати вплив динамічних параметрів збудження та резонансних ефектів на перебіг ущільнення. Додатково вивчаються питання впливу конструктивних параметрів обладнання, зокрема маси привантажувача, величини зазору та тривалості ущільнення, на кінцеві міцнісні характеристики матеріалу. Однак бракує системних експериментальних досліджень, які б комплексно аналізували роботу комбінованих імпульсно-вібраційних установок із варіативними режимами ущільнення. Це зумовлює актуальність проведення досліджень у даному напрямі.

**Мета досліджень.** Метою проведених експериментальних досліджень є визначення ефективних параметрів запропонованої комбінованої імпульсно-вібраційної установки для ущільнення легких бетонних сумішей, перевірка аналітичних моделей та встановлення оптимальних режимів ущільнення для умов заданої лабораторної конструкції.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Розроблена лабораторна установка (рисунок 1) дозволяє моделювати процес імпульсно-вібраційного ущільнення легких бетонів (арболіт, полістиролбетон) в умовах, максимально наближених до промислових. Габарити формувального блоку – 800 × 600 мм, висотою виробу 100 мм або 200 мм, об’ємна маса – 800 кг/м<sup>3</sup>. Загальна маса рухомої частини з формою та сумішшю становить близько 1000 Н.

Установка складається з: рухомої рами 3, яка здійснює вертикальні переміщення за допомогою кулачкового механізму; кулачкового підйомного механізму 4, який забезпечує періодичне підняття та скидання рами з формою; горизонтального віброзбуджувача, змонтованого безпосередньо на формі, який активує суміш у горизонтальному напрямку та зменшує її внутрішній опір; опор - обмежувачів коливань 2, що встановлені під рухомою рамою з регульованим зазором від 1 до 15 мм; привантажувача 7.

Загальна конструкція обладнання дозволяє змінювати модуль пружності пружних елементів, масу ударних елементів та параметри віброзбудження.

З огляду на специфіку комбінованої імпульсно-вібраційної установки, яка використовується у даних дослідженнях, та з метою забезпечення точного контролю параметрів ущільнення, було проаналізовано фізичну сутність і технологічну чутливість вищезазначених змінних було проаналізовано [8]. У результаті для реалізації багатофакторного експерименту обрано три ключових фактори.

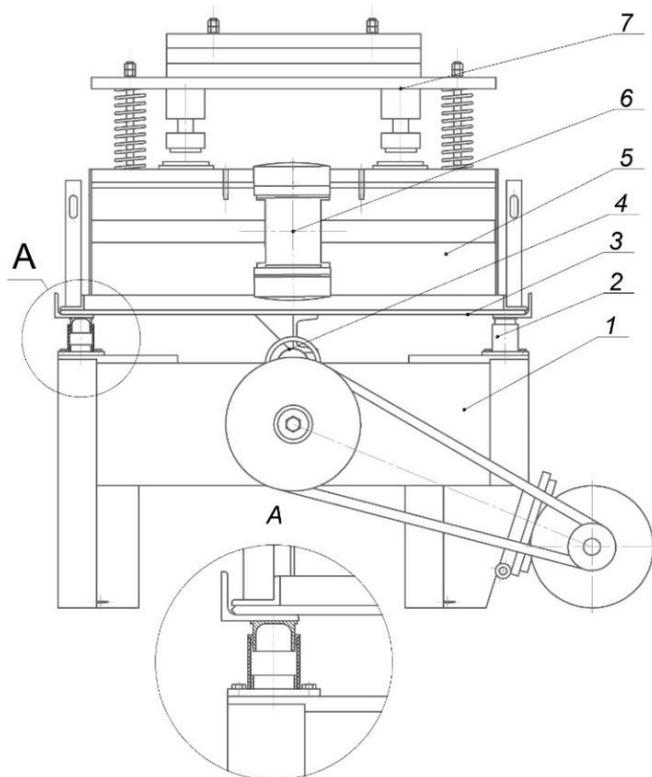


Рисунок 1 – Схема установки

- 1 – рама, 2 – опори, 3 – рама рухома,
- 4 – кулачковий механізм, 5 – форма,
- 6 – вібробуджувач, 7 – привантажувач.

Зазор між рухомою та нерухомою рамою ( $X_1$ ) – безпосередньо впливає на тривалість та інтенсивність ударної взаємодії.

Маса рухомої частини привантажувача ( $X_2$ ) – в установці привантажувач складається з двох частин: верхньої рухомої з ударними елементами (яка варіюється в межах 100 Н, 200 Н та 300 Н) та нижньої нерухомої з вбудованим вібробуджувачем. Ця маса значною мірою визначає імпульс удару.

Тривалість ущільнення ( $X_3$ ) – критичний параметр, який впливає на щільність, міцність, однорідність полістеролбетонного виробу.

Під час реалізації плану експерименту до кожного з факторів висувалися однакові вимоги: керованість, незалежність один від одного, можливість варіювання в межах, достатніх для прояву їх впливу на міцність бетонної суміші. Кодування факторів представлено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Результати кодування факторів

Фактор	Дійсне значення	Кодоване значення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				Дійсні			Кодовані		
				Верхній	Нижній	Нульовий	Верхній	Нижній	Нульовий
Зазор між рухомою та нерухомою рамою (мм)	a	$X_1$	5	15	5	10	+1	-1	0
Маса рухомої частини привантажувача (Н)	m	$X_2$	100	300	100	200	+1	-1	0
Тривалість ущільнення (с)	t	$X_3$	20	60	20	40	+1	-1	0

При цьому матриця планування експерименту буде мати такий вигляд – таблиця 2. В таблиця 2 наведено всі можливі комбінації для проведення експериментальних досліджень. Рівні варіювання факторів закодовані  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ . Склад полістеролбетонної суміші наведено на в таблиці 3.

Таблиця 2

Матриця планування експериментальних досліджень

Номер експерименту	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

Процес виготовлення зразків передбачав попереднє укладання у формоутворювальну оснастку листа гіпсокартону, монтаж арматурного каркаса та послідовне завантаження полістеролбетонної суміші. На наступному етапі здійснювалося накриття суміші другим листом гіпсокартону, встановлення привантажувача та активація комбінованої

імпульсно-вібраційної установки, яка забезпечувала ущільнення з одночасним впливом вертикальних і горизонтальних коливань. Після завершення віброущільнення витримувалася короткотривала технологічна пауза для стабілізації структури суміші та зменшення внутрішніх напружень. Листи гіпсокартону перед використанням зволожувалися з метою зниження водопоглинання та запобігання утворенню поверхневих дефектів. У результаті формувалася рівномірна плоска панель із полістиролбетону з інтегрованим гіпсокартонним облицюванням, що забезпечувало готовність виробу до застосування у складі стінових конструкцій.

Після завершення первинного тужавіння здійснювалася розпалубка форми, а виріб залишався на піддоні до закінчення нормативного терміну витримки. Зразки витримувалися у вологому середовищі з відносною вологістю  $95 \pm 5\%$  та температурою  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  протягом 28 діб, після чого з сформованої панелі проводилося випилювання кубічних зразків розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм.

Механічна обробка здійснювалася стрічковою пилкою або дисковою фрезою з низьким рівнем вібрації, щоб уникнути пошкодження внутрішньої структури матеріалу; геометричні параметри зразків перевірялися згідно з вимогами стандартів. Ущільнення суміші проводили за двома схемами: лише під дією вертикальних імпульсних навантажень або з одночасним застосуванням горизонтальних вібрацій, що імітувало комбіновану дію.

Випробування міцності на стиск зразків проводилися на гідравлічному пресі типу ПГМ, із дотриманням вимог до встановлення зразка, перевірки геометрії, нульового положення шкали та герметичності гідросистеми, що забезпечувало точність і повторюваність результатів. Навантаження виконувалося рівномірно та без ривків, зі швидкістю навантаження, яка підтримувалося в межах  $0,2$  МПа/с. Випробування тривало до моменту руйнування зразка, при якому фіксувалося максимальне значення сили, що відповідає граничній міцності. Результати експериментальних досліджень без горизонтальних коливань та з горизонтальними коливаннями наведено в таблицях 4 та 5.

Таблиця 3

Склад полістиролбетонної суміші

Компонент	на $1 \text{ м}^3$	на $0,05 \text{ м}^3$
Портландцемент СЕМ І 42.5	330 кг	16,5 кг
Пісок (фракція 0–2 мм)	230 кг	11,5 кг
Гранули пінополістиролу (EPS)	10 кг	0,5 кг
Вода	150 л	7,5 л
Пластифікатор (0,8% від цементу) BauGut BauPLAST Beton	~2,6 кг	130 мл

Результати експериментальних досліджень (без горизонтальних коливань)

№ експерименту	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетону		
	1	2	3
1	3,211	3,230	3,249
2	3,485	3,500	3,515
3	3,520	3,540	3,560
4	3,270	3,280	3,290
5	3,504	3,520	3,536
6	3,560	3,580	3,600
7	3,284	3,300	3,316
8	3,517	3,540	3,563
9	3,566	3,580	3,594
10	3,236	3,250	3,264
11	3,510	3,530	3,550
12	3,559	3,580	3,601
13	3,293	3,310	3,327
14	3,536	3,560	3,584
15	3,593	3,620	3,647
16	3,292	3,320	3,348
17	3,552	3,570	3,588
18	3,577	3,590	3,603
19	3,255	3,270	3,285
20	3,555	3,580	3,605
21	3,585	3,610	3,635
22	3,293	3,320	3,347
23	3,565	3,580	3,595
24	3,610	3,630	3,650
25	3,324	3,340	3,356
26	3,586	3,610	3,634
27	3,601	3,620	3,639

Для кращої візуалізації та інтерпретації отриманих експериментальних результатів були побудовані поверхні відгуку, які наочно ілюструють вплив досліджуваних факторів на вихідну характеристику. У рамках реалізованої моделі планування один із факторів утримувався на фіксованому (середньому) рівні, тоді як два інші варіювалися в межах заданого інтервалу. Побудова поверхонь відгуку дозволила простежити закономірності зміни міцності матеріалу залежно від варіації впливових параметрів. Графічне подання результатів у вигляді тривимірних поверхонь та їх двовимірних проєкцій дозволило детально проаналізувати характер взаємодії факторів. Відповідні графіки наведено на рисунках 2–7.

## Результати експериментальних досліджень (з горизонтальними коливаннями)

№ експерименту	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетону		
	1	2	3
1	3,233	3,255	3,202
2	3,581	3,567	3,592
3	3,663	3,671	3,706
4	3,270	3,278	3,322
5	3,588	3,614	3,568
6	3,716	3,712	3,732
7	3,301	3,322	3,277
8	3,655	3,675	3,710
9	3,717	3,723	3,750
10	3,268	3,263	3,279
11	3,624	3,620	3,676
12	3,718	3,730	3,712
13	3,342	3,330	3,318
14	3,687	3,686	3,667
15	3,727	3,746	3,747
16	3,335	3,345	3,370
17	3,609	3,629	3,682
18	3,760	3,735	3,725
19	3,354	3,358	3,368
20	3,685	3,695	3,660
21	3,782	3,768	3,760
22	3,421	3,397	3,442
23	3,695	3,703	3,702
24	3,784	3,759	3,797
25	3,443	3,437	3,440
26	3,732	3,758	3,700
27	3,786	3,747	3,777

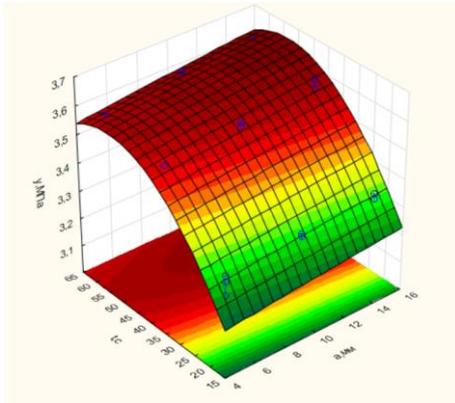


Рисунок 2 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів  $t$  та  $a$  при  $m=200\text{Н}$  (при ущільненні без горизонтальних коливань)

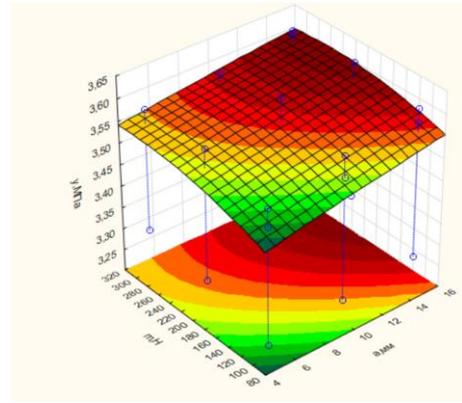


Рисунок 3 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів  $m$  та  $a$  при  $t=40\text{с}$  (при ущільненні без горизонтальних коливань)

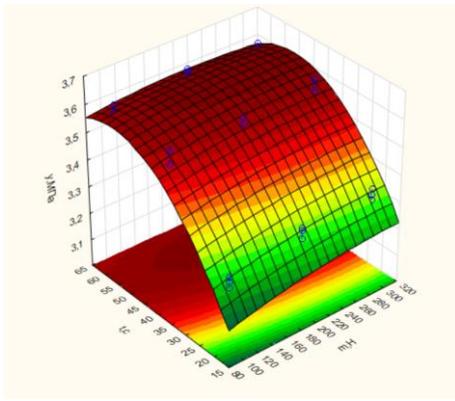


Рисунок 4 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів  $m$  та  $t$  при  $a=10\text{мм}$  (при ущільненні без горизонтальних коливань)

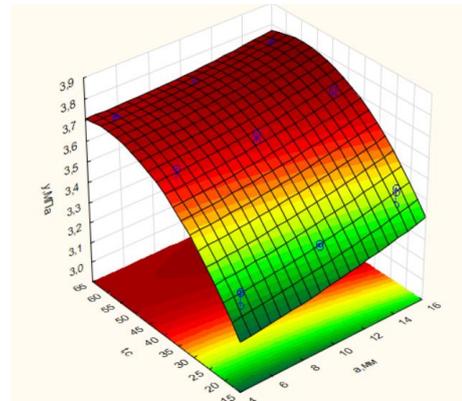


Рисунок 5 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів  $t$  та  $a$  при  $m=200\text{Н}$  (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

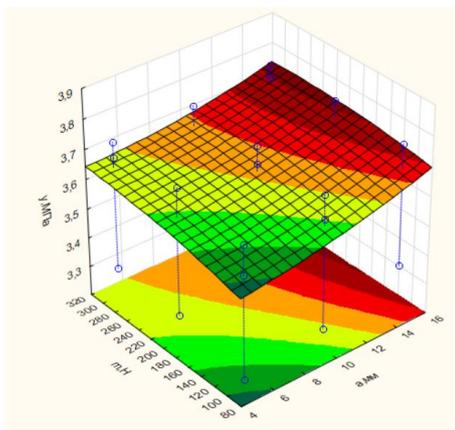


Рисунок 6 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів  $m$  та  $a$  при  $t=40\text{с}$  (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

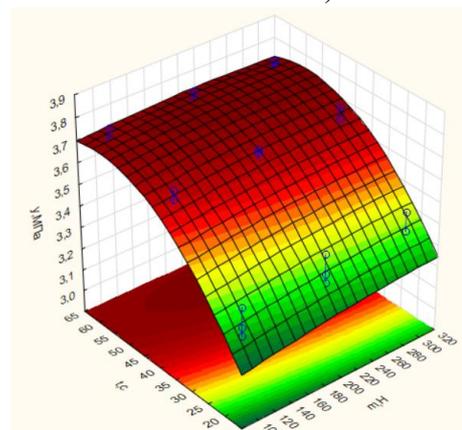


Рисунок 7 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів  $m$  та  $t$  при  $a=10\text{мм}$  (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

**Висновки:** Спроектовано та виготовлено лабораторну комбіновану імпульсно-вібраційну установку для ущільнення легких бетонів. Проведено експериментальні дослідження з використанням методики планування експерименту, із варіюванням зазору між рухомою та нерухомою рамами (5–15 мм), маси привантажувача (100–300 Н) та тривалості ущільнення (20–60 с) відповідно до повного факторного плану типу 3<sup>3</sup>. Встановлено оптимальні параметри ущільнення в межах плану без горизонтальних коливань  $a = 15\text{мм}$ ,  $m = 300\text{Н}$ ,  $t = 52\text{с}$  та при горизонтальних коливаннях  $a = 15\text{мм}$ ,  $m = 300\text{Н}$ ,  $t = 41\text{с}$ .

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
2. Maslov O., Savielov D. Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2020. – No 4. – С. 84–90. – DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>
3. Назаренко І., Дедов О., Дьяченко О. Обґрунтування алгоритму розрахунку вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – No 93. – С. 19–26.
4. Назаренко І. І., Дьяченко О. С. Експериментальні дослідження робочого процесу вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2018. – Вип. 92. – С. 24–31.
5. Nesterenko M.M., Vedmid V.V. Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction // System technologies. – 2025. – Vol. 3, No. 158. – P. 201–208. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-158-2025-20> (дата звернення: 11.06.2025).
6. Nesterenko M., Maslov A., Salenko J. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, No 3.2. – P. 260–264. – DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>
7. Черевко О. М., Давиденко Ю. О., Черевко П. О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей // Зб. наук. пр. (Галузеве машинобудування, будівництво) / редкол.: О. Г. Онищенко (голов. ред.) [та ін.]. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – Вип. 26. – С. 138–146.
8. Пічугін С.Ф., Нестеренко М.М. Дослідження режимів ущільнення легкобетонних сумішей на ударно-вібраційній установці методом математичного планування експерименту // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 1 (36), т. 1. – С. 183–190.

#### REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system* [Applied Problems of the Theory of Vibrating Systems] (2nd ed.). Kyiv: Vydavnychiy Dim "Slovo".
2. Maslov, O., & Savielov, D. (2020). Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it. *Transactions of*

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, (4), 84–90.  
<https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>

3. Nazarenko, I., Diedov, O., & Diachenko, O. (2019). Obgruntuvannia alhorytmu rozrakhunku vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Justification of the Calculation Algorithm for a Vibration Installation for Compaction of Concrete Mixtures with a Variable Operating Mode]. Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines, (93), 19–26.

4. Nazarenko, I. I., & Diachenko, O. S. (2018). Eksperymentalni doslidzhennia robochoho protsesu vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Experimental Studies of the Vibration Installation Operating Process for Compaction of Concrete Mixtures with a Variable Mode]. Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines, (92), 24–31.

5. Nesterenko, M. M., & Vedmid, V. V. (2025). Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction. System Technologies, 3(158), 201–208.  
<https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-158-2025-20>

6. Nesterenko, M., Maslov, A., & Salenko, J. (2018). Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture. International Journal of Engineering and Technology, 7(3.2), 260–264. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>

7. Cherevko, O. M., Davydenko, Yu. O., & Cherevko, P. O. (2010). Vplyv parametriv vibratsii na protses ushchilnennia betonnykh sumishei [Influence of Vibration Parameters on the Process of Concrete Mixture Compaction]. In Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Collected Scientific Works (Industrial Engineering, Construction) (Vol. 26, pp. 138–146). Poltava: PoltNTU.

8. Pichuhin, S. F., & Nesterenko, M. M. (2013). Doslidzhennia rezhymiv ushchilnennia lehkobetonnykh sumishei na udarno-vibratsiinii ustanovtsi metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu [Investigation of Compaction Modes of Lightweight Concrete Mixtures on a Impact-Vibrational Installation by the Method of Mathematical Experiment Planning]. Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Collected Scientific Works (Industrial Engineering, Construction), 1(36), Part 1, 183–190.

Received 23.06.2025.

Accepted 26.06.2025.

### ***Experimental studies of a combined impulse-vibration installation***

*The article presents the results of experimental studies on the compaction process of polystyrene concrete mixture using a specially developed combined impulse-vibration installation. The relevance of the research is due to the need to increase the density and compressive strength of lightweight concrete products by improving the compaction technology. The aim of the study is to determine the effective compaction parameters (gap between frames, mass of the loading device, and duration of action) and to evaluate the influence of horizontal vibrations on the strength of the products. The research methods included experimental design, physical modeling, and analysis of results using response surface methodology. It was found that the use of combined loading allows for an increase in compressive strength by 5–7% compared to traditional impulse compaction. The obtained*

*results can be used to optimize technological parameters for the production of wall elements made of polystyrene concrete.*

*Keywords: polystyrene concrete, impulse-vibration compaction, combined oscillations, laboratory setup, loading device, compressive strength, gap, compaction duration, experiment, response surface.*

**Ведмідь Василь Васильович** - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID: 0000-0003-1514-1212

**Нестеренко Тетяна Миколаївна** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID: 0000-0002-2387-8575

**Нестеренко Микола Миколайович** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID:0000-0002-4073-1233

**Пирлик Маклим Олександрович** - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID:0009-0006-1343-9516

**Vedmid Vasyi** - Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ORCID: 0000-0003-1514-1212

**Tetiana Nesterenko** – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering and Technologies, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ORCID: 0000-0002-2387-8575

**Mykola Nesterenko** - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ID ORCID: 0000-0002-4073-1233

**Pyrlyk Maklym** – Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ORCID: 0009-0006-1343-9516

## RESEARCH OF TIRE WEAR ON PORT CONTAINER SEMI-TRAILERS

*Abstract. Seaports play a crucial role in supporting global trade and logistics. They act as key hubs connecting various nations and regions. As integral components of the global supply chain, ports function as entry and exit points for goods, facilitating seamless transitions between different modes of transportation.*

*In the rapidly evolving landscape of international trade, port semi-trailers hold a central position in facilitating the smooth flow of goods. These specialized vehicles are designed to efficiently transport containers between ports, terminals, and inland logistics centers. They combine a durable design, high load capacity, and advanced technology, ensuring reliability and safety in the most challenging operating conditions.*

*The purpose of the study was to assess the degree of damage and to study the patterns of intensity and nature of tread wear on the tires of port semi-trailers carrying containers.*

*24 identical container semi-trailers were inspected, which are operated in 4 Black Sea ports. The mileage of the trailers varies slightly, and they are used to transport 40-pound containers.*

*In the course of research, the residual depth of the tire tread was measured and compared with previous values, which allowed to establish the dynamics of wear under operating conditions. An analysis of vehicle inspections and logs has shown that the main causes of failure are tire tread wear, local destruction of tread pattern elements, damage to the breaker and frame due to external influences. A special tire depth gauge was used to measure tread wear. Tire wear is not proportional to mileage, but has a more complex nonlinear relationship. This often poses a direct threat to road safety. A detailed analysis showed that the wear on the trailer's tire treads was caused by the following factors: incorrect tire pressure, regular overloading, and improper wheel balancing.*

*Optimizing the tire wear of a container truck trailer requires a comprehensive program that includes the following elements: selecting high-performance tires, performing regular maintenance, monitoring tire pressure, ensuring even load distribution, and improving driver training.*

*Keywords: wear, container semi-trailers, port, tire, resource.*

**Introduction.** Ports are indispensable for enabling global commerce and logistical operations. They act as critical junctions, linking nations and regions together. As integral parts of the international supply chain, ports function as entry and exit points for goods, ensuring smooth transitions between different transportation methods [1,2].

Choosing a port container semi-trailer is a strategic decision that can significantly impact the efficiency of logistics operations. It is important to consider factors such as payload capacity, chassis type, additional features, and safety requirements. Investing in a modern and reliable container semi-trailer can lead to reduced operating costs, increased productivity, and improved cargo security.

In the dynamic world of global trade, port semi-trailers play a crucial role in ensuring the smooth flow of goods. These specialized vehicles are designed to efficiently transport containers between ports, terminals, and inland logistics centers. They combine robust construction, high payload capacity, and advanced technology, ensuring reliability and safety in the most challenging operating environments [1-2].

Modern port container semi-trailers are equipped with a range of innovative features that enhance their efficiency and safety. Container Locking Systems (CLS) provide secure locking of containers during transportation, preventing them from shifting or getting damaged. Air suspension and electronic brake control systems (EBS) ensure smooth driving and optimal braking, enhancing road safety. Additionally, they are equipped with monitoring and control systems that allow for tracking the location of cargo, monitoring its condition, and maximizing the efficiency of logistics operations.

The main advantage of the port container semi-trailer is its maneuverability. The shorter base and improved steering system make it easy to move between container yards, storage areas, and berths. This significantly reduces cargo handling time and increases the overall capacity of the port. [3-8].

**Literature Review.** Tires are the link between the vehicle and the road. During operation, tires gradually wear out, which is inevitable due to various factors such as the type of road surface (asphalt or dirt), the vehicle's technical condition, and driving style [3-9].

The difficulty in assessing the degree of wear on truck tires is due to the specific composition of the rubber used to create a wear-resistant coating. Manufacturers use durable, thick, and dense rubber in the tread, which makes it difficult to visually identify wear and reduce the tread height. Failure to detect wear in a timely manner can lead to damage to the vehicle's chassis, reduced control, increased fuel consumption, and loss of vehicle stability [3-9].

Semi-trailer tires are subjected to severe testing due to constantly changing road and weather conditions. Therefore, it is crucial to understand why they wear out and take effective measures to extend their lifespan and ensure safe operation.

**The purpose** of the study was to assess the degree of damage and to study the patterns of intensity and nature of tread wear on the tires of port semi-trailers carrying containers. Research methodology and results.

24 identical container semi-trailers were inspected, which are operated in 4 Black Sea ports. The mileage of the trailers varies slightly, and they are used to transport 40-pound containers.

The condition of the lateral surface, shoulder, and front part of the tire tread was carefully examined. The test report provides detailed information and visual representations

of the existing operational defects. The focus is on significant damage that may prevent the tire from being used further.

In the course of research, the residual depth of the tire tread was measured and compared with previous values, which allowed to establish the dynamics of wear under operating conditions. It should be noted that this method does not require complex equipment, preliminary impact on the tire, allows to determine the unevenness of tire wear, both in the width of the tread coating and in the length of its circumference. A special tire depth gauge was used to measure tread wear. The wear degree of the tread was measured at the points indicated in Figure 1. The accuracy of the measurements was 0.01 millimeters (Fig.2).

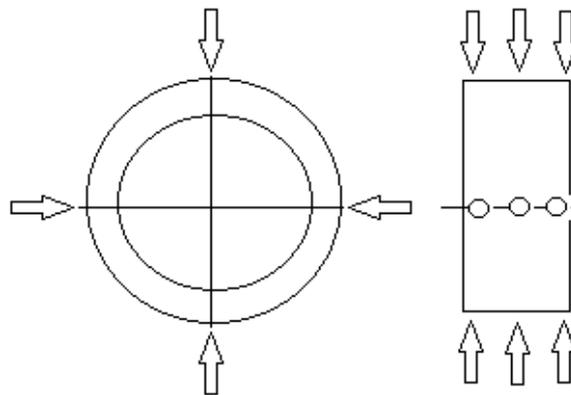


Figure 1 - Tire tread height measurement scheme



Figure 2 - Digital tread depth sensor

Each tread depth measurement was accompanied by the inclusion of the vehicle's technical and registration data in the test report, as well as a detailed description of the shape of the tire damage.

An analysis of vehicle inspections and logs has shown that the main causes of failure are tire tread wear, local destruction of tread pattern elements, damage to the breaker and frame due to external influences. The latter is caused by hitting a road obstacle at high speed (a rail, an open manhole, etc.) and a violation of tire manufacturing technology.

Uneven tire wear on a truck is characterized by different degrees of tread wear in different areas of the same tire. This should be distinguished from uneven wear, where the tread wears evenly across the surface but with different intensity depending on the position of the tire on the axle. Tire wear is caused by the friction between the tread and the road surface as the wheel rolls.

Tire wear is not proportional to mileage, but has a more complex nonlinear relationship. Taking into account the changing intensity of wear, the operating period of a tire is conventionally divided into three sections: initial wear (1), stable wear (2), and the critical wear stage (3), which requires separate consideration (Fig.3).

Accordingly, the break-in and intensive wear stages are smooth functional dependencies of the residual tread pattern height on the tire's service life. This means that they allow for changes in wear intensity as the tire's service life increases. At the same time, in the constant phase, wear follows a linear relationship, and the tangent of the slope of the straight line,  $\psi$ , represents the average wear intensity (Fig.3). [6-9].

In practice, it is more convenient to assess the percentage of tread wear, which serves as an indicator of the tire's condition, and it is important for drivers to monitor this. Premature tire failure can lead to significant losses for fleet operators, far exceeding the costs associated with damage. As the condition of the tires directly affects the safety, handling, speed, and longevity of the vehicle, it is the driver's responsibility to prevent tire wear.

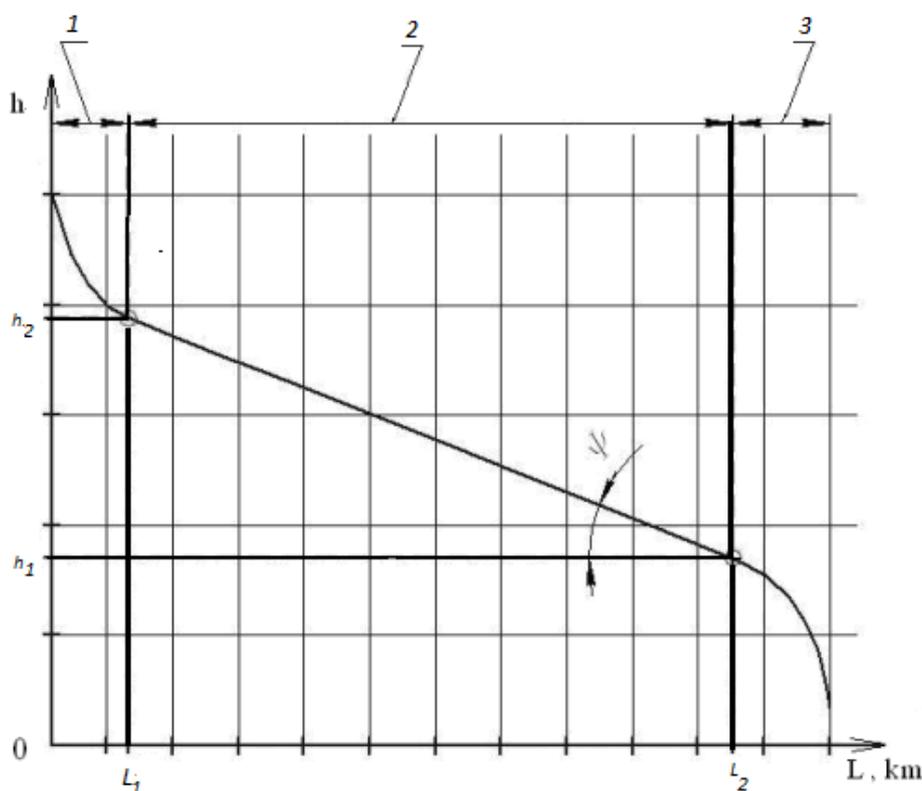


Figure 3 - Dependence of tread wear  $h$  on tire mileage  $L$

The service life of tires is significantly reduced due to aggressive driving styles characterized by slippage at start-up, sharp braking and high-speed maneuvers. Damage can also be caused by obstacles and contact with curbs. An equally important factor is wheel imbalance, which causes periodic impact loads, leading to overstrain of the tire carcass and, consequently, to rapid wear of the tread.

In the course of research, it was found that the tire pressure of some trailers is lower than the recommended value, which leads to an increase in the contact patch with the road and

a decrease in the specific tire pressure on the surface. However, due to the deformation of the tire inward, the so-called "bending effect" occurs, which causes the average load on the tread to decrease, while the load on its edges increases significantly, resulting in increased material stress.

As a result of the uneven distribution of pressure in the contact area, the tread wears unevenly. The tread edges are subjected to heavy damage, and wear often takes the form of notches or waves. This has a negative impact on the tire's lifespan and vehicle handling.

The detected comb-like wear on the tire is caused by the deformation of the tread in the area of contact with the road surface. The cyclic compression and straightening of the tread blocks as the wheel rotates leads to preferential wear on the front edge. Multiple wear spots around the tire's perimeter are typically indicative of wheel imbalance, which can negatively impact ride quality and cause vibrations. Localized wear in the form of a flat spot is a result of wheel lockup during emergency braking.

Deformation of the trailer shaft housing and the axle bushing under load, combined with gaps in the wheel hub assemblies and uneven road surfaces, can lead to the phenomenon of "twisting" of the wheel. This effect is exacerbated when driving on curved sections of the road. The non-perpendicularity of the wheel to the road surface causes an uneven distribution of pressure in the tire contact patch, resulting in lateral sliding and, consequently, intense wear on the inner side of the trailer axle tire tread.

A decrease in tire diameter implies a decrease in the distance traveled per wheel rotation, which creates the prerequisites for an increase in cyclic load. As a result, during the operation, the number of working cycles for the tire increases, which, in turn, leads to more intensive wear of the tread. Thus, a reduced tire diameter accelerates the process of abrasion.

Two trailers were also found to have delamination starting after the transition from the bead ring to the sidewall. Oblong delamination without irregularities or breaks in the cords. In this case, only the outer layer of the rubber was damaged due to the formation of a joint under the rubber wall.

Exceeding the permissible load weight by commercial vehicles has a negative impact on the durability of tires. This occurs when the weight of the cargo exceeds the established limits, or due to improper weight distribution.

The dragging or dragging that was detected can be explained by the differences in diameter, pressure, and residual tread depth in the wheelset. If the tires have different diameters, the smaller tire will constantly drag, acting as a brake. Additionally, the differences in tire pressure can cause uneven distribution of stress, leading to localized wear.

Intense acceleration and braking create excessive stress on the tires, leading to the formation of microcracks and reducing their durability.

When installing new tires, you should balance the wheels.

It should be noted that half of the samples studied used cheaper tires. The results are presented in Fig.4.

Since rubber is a thermoplastic, heating it from 0 to 100 °C weakens the intermolecular bonds, resulting in a 2-3-fold decrease in strength.

Normal wear of a rebuilt tire is considered to be wear when it has reached its intended mileage, even if it cannot be rebuilt again.

The maximum tread height is  $h_{\min}=1$  mm.

An increase in the tire's service life leads to a greater variation in the residual tread depth (Figure 4), which is a result of the inconsistent wear rates in different areas of the tire.

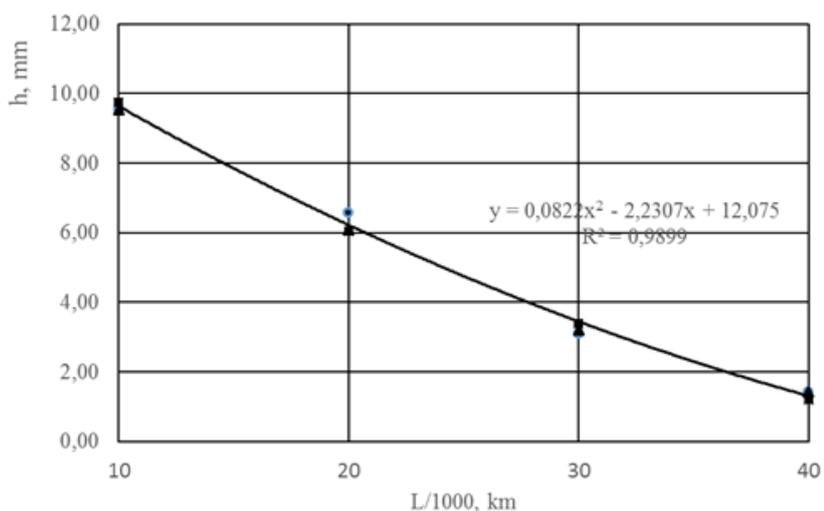
In the critical wear phase, tire wear accelerates significantly, becomes more susceptible to external conditions and internal parameters, and approaches the limit state (see Figure 4).

It should be noted that half of the samples studied used cheaper tires.

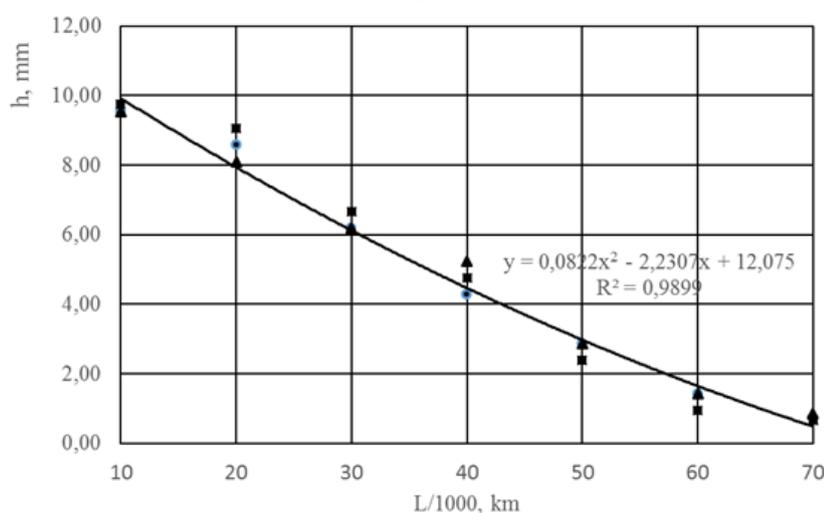
As a result, they failed twice as fast.

Sea water that gets on the tires contains a high concentration of salt. As the salt penetrates the microcracks in the rubber, it crystallizes and expands, gradually destroying the material's structure. This process is accelerated by the fluctuations in temperature and humidity that are common in coastal areas.

High humidity in the marine environment contributes to the corrosion of metal elements in tires, such as the cord and rims.



a)



b)

Figure 4 - Dependence of wear  $h$  on tire run  $L$  for regular (a) and special port-specific tires (b)

Abrasive materials such as sand and small stones carried by wind and water act like sandpaper, wearing down the tread and damaging the tire sidewalls. This is especially relevant in ports, where trailers often move over uneven surfaces and come into contact with various contaminants.

From an economic point of view, the most disadvantageous moment in using a tire is when it reaches the state of extreme wear. Experience shows that more than 80% of tread failures and tire frame damage that cannot be repaired occur when the tires have already reached the end of their useful life.

The most important task of a transport company is to reduce operating costs and ensure the proper functioning of its fleet. To achieve this goal, approaches have been developed to determine the resource of truck tires, taking into account the individual statistics of their actual service life. Additionally, the remaining service life of the tires is predicted through regular monitoring of the tread depth. The most reliable method of predicting the service life of tires is by calculating the actual wear rate, which is based on systematic measurements of the residual tread depth.

It is advisable to determine the residual depth of the tread pattern under conditions that are close to the actual operation of the vehicle. This will allow you to create a reliable data set that can be used for various analytical purposes. In particular, this information can be used to predict the individual life of the tires, to assess the wear on different axles, and to plan the optimal timing for replacing the entire set or individual tires that are most worn out, including the use of spare wheels.

As a result of this complex impact, port trailer tires wear out much faster than tires used in normal conditions. This leads to increased maintenance and repair costs, as well as potential safety risks.

Taking into account that wear usually stops by the time of the first measurement of the residual tread depth, and considering the variability of the pattern depth on new tires, the initial stage of wear (break-in) can be excluded from the calculations. Thus, the calculation of the wear rate should be performed only for the linear section of the dependence, determining the average rate after each measurement.

In addition, it is worth considering modern technologies that help to monitor the condition of tires in real-time. Tire Pressure Monitoring Systems (TPMS) allow you to track the pressure and temperature in each tire, providing warnings about potential issues. This enables you to take timely action and prevent serious damage.

There are also special training programs for drivers, which teach them the correct driving style, allowing to reduce tire wear and increase road safety. Trained drivers are more attentive to the condition of the equipment, observe the speed limit and avoid sharp maneuvers.

Ultimately, effective management of container truck trailer tire wear requires a comprehensive approach that includes the selection of high-quality tires, regular maintenance, pressure monitoring, proper load distribution, and driver training. By doing so, it is possible to ensure the safety of transportation, reduce operating costs, and extend the lifespan of the tires.

Additionally, it is crucial to keep track of the mileage and condition of each tire, which can help in more accurate replacement planning and cost optimization.

**Conclusions.** Tire wear on container truck trailers is an inevitable process that directly affects the safety, cost-effectiveness, and efficiency of transportation. Understanding the causes, signs, and methods of dealing with tire wear is crucial for fleet owners and drivers.

It is important to remember that saving on tires can lead to much higher costs in the future. Poor-quality or worn-out tires increase the risk of accidents, lead to increased fuel consumption, and require more frequent suspension repairs. You should also pay attention to tire pressure monitoring systems (TPMS), which allow you to monitor the pressure and temperature in each tire, providing warnings about potential issues. Therefore, investing in high-quality tires and regular maintenance is an investment in the safety and efficiency of business.

#### REFERENCES

1. Verschuur, J., Koks, E. E., & Hall, J. W. (2022). Ports' criticality in international trade and global supply-chains. *Nature Communications*, 13(1), 1-13.
2. Ayhan, E. E. (2023). From Ports to Prosperity: Leveraging Maritime Sector for Poverty Reduction. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 3(2), 99-109.
3. Peng, X. D., Guo, K. H. (2003). Effective factors on tire wear. *China Rubber Industry*, 50(10), 619-624.
4. Boleso, D. (2019). A semi-trailer for a moving laboratory. Complete measuring system and semi-trailer design.
5. Bęczkowska, S., Korzeb, J., Koziak, S., Opala, M., & Weysenhoff, A. (2018). Niejednorodność i wady materiałowe opon samochodów osobowych – zagadnienia wybrane. *WUT Journal of Transportation Engineering*, (121), 9-20.
6. Kravchenko, A., Sakno, O., Lukichov, A. (2012). Research of dynamics of tire wear of trucks and prognostication of their service life. *Transport problems*, 7(4), 85-94.
7. Balaka, M. M., & Balaka, M. N. (2014). Vplyv umov ekspluatatsii na dovhovichnist velykohabarytnykh shyn. [*The influence of operating conditions on the durability of large tires*], 92 79–86
8. Jančár, A., Ondruš, J., & Csenkey, J. (2025). Assessment of the axle loads on the semi-trailer: case study. *Transportation Research Procedia*, 87, 205-216.
9. He, J. F., Jin, X. X., & Hou, C. Y. (2011). Simulation Analysis and Research of Tire Wear. *Advanced Materials Research*, 299, 1212-1216.

Received 23.06.2025.

Accepted 26.06.2025.

#### ***Дослідження зносу шин портових контейнерних напівпричепів***

*Морські порти відіграють вирішальну роль у підтримці світової торгівлі та логістики. Вони виступають ключовими вузлами, що з'єднують різні країни та регіони. Як невід'ємні компоненти глобального ланцюга поставок, порти функціонують як точки входу та виходу товарів, сприяючи безперешкодному переходу між різними видами транспорту.*

*У швидкозмінному ландшафті міжнародної торгівлі портові напівпричепи займають центральне місце у сприянні безперебійному потоку товарів. Ці спеціалізовані*

*транспортні засоби призначені для ефективного перевезення контейнерів між портами, терміналами та внутрішніми логістичними центрами. Вони поєднують міцну конструкцію, високу вантажопідйомність та передові технології, забезпечуючи надійність та безпеку в найскладніших умовах експлуатації.*

*Метою дослідження було оцінити ступінь пошкодження та вивчити закономірності інтенсивності та характеру зносу протектора шин портових напівпричепів, що перевозять контейнери.*

*Було перевірено 24 однакові контейнерні напівпричепи, які експлуатуються в 4 портах Чорного моря. Пробіг причепів децю відрізняється, і вони використовуються для перевезення 40-фунтових контейнерів.*

*У процесі дослідження було виміряно залишкову глибину протектора шин та порівняно з попередніми значеннями, що дозволило встановити динаміку зносу в умовах експлуатації. Аналіз оглядів транспортних засобів та журналів показав, що основними причинами відмов є знос протектора шин, локальне руйнування елементів малюнка протектора, пошкодження брекера та рами внаслідок зовнішніх впливів. Для вимірювання зносу протектора використовувався спеціальний вимірювач глибини протектора шин. Знос шин не пропорційний пробігу, а має більш складну нелінійну залежність. Це часто створює пряму загрозу безпеці дорожнього руху. Детальний аналіз показав, що знос протектора шин причепа був спричинений такими факторами: неправильний тиск у шинах, регулярне перевантаження та неправильне балансування коліс.*

*Оптимізація зносу шин контейнеровоза вимагає комплексної програми, яка включає такі елементи: вибір високопродуктивних шин, проведення регулярного технічного обслуговування, контроль тиску в шинах, забезпечення рівномірного розподілу навантаження та покращення навчання водіїв.*

*Ключові слова: знос, контейнерні напівпричепи, порт, шина, ресурс.*

**Стрельбіцький Віктор Васильович** – доцент, кандидат технічних наук, кафедра Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання, Одеський національний морський університет.

**Strelbitskyi Viktor Vasylovych** – PhD, associated professor, Hoisting and transport machines and engineering of port technological equipment, Odessa National Maritime University.

Т.В. Селівьорстова, Ю.В. Мала, А.І. Гуда,  
Д.Г. Зеленцов, Б.О. Кокович, О. Веровкін

## ОЦІНКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЙМОВІРНОСТІ ЗАВЕРШЕННЯ ІТ-ПРОЄКТУ ЗА МЕТОДОМ PERT

*Анотація.* У статті досліджено застосування методу PERT (Program Evaluation and Review Technique) для аналізу й оптимізації строків реалізації ІТ-проектів в умовах невизначеності. Метод PERT дозволяє моделювати часові параметри задач проекту на основі трьох експертних оцінок (оптимістичної, ймовірної та песимістичної), обчислювати очікувану тривалість проекту та оцінювати ймовірність його завершення у встановлений термін. Запропоновано формалізовану постановку оптимізаційної задачі, що передбачає мінімізацію ризику затримки шляхом впливу на параметри задач критичного шляху: зменшення тривалості та дисперсії. Проведено обчислювальний експеримент на прикладі умовного ІТ-проекту з 9 задачами, де визначено критичний шлях і оцінено ймовірність своєчасного завершення при заданому дедлайні. Здійснено оптимізацію, в результаті якої ймовірність завершення проекту у строк зросла з 15.78% до 43.34%. Отримані результати демонструють доцільність поєднання PERT з методами математичного моделювання при плануванні складних проектів. Показано, що навіть незначні зміни у параметрах задач можуть суттєво знизити ризики і підвищити надійність дотримання строків реалізації ІТ-проектів.

*Ключові слова:* PERT, ІТ-проект, критичний шлях, оптимізація, ймовірність, дедлайн, дисперсія.

**Вступ.** В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій дедалі важливішого значення набуває ефективне управління ІТ-проектами. Одним з ключових факторів успішної реалізації таких проектів є дотримання строків виконання, що часто ускладнюється невизначеністю в оцінках тривалості робіт, залежністю між задачами, обмеженістю ресурсів та динамічністю зовнішнього середовища [1]. Метод PERT (Program Evaluation and Review Technique), розроблений у середині ХХ століття для потреб управління складними дослідницько-технічними програмами, демонструє високу ефективність в умовах невизначеності та багатоваріантності. На відміну від детермінованих методів планування, PERT базується на ймовірнісному підході до оцінки тривалості робіт, що дозволяє враховувати ризики та варіативність при ухваленні управлінських рішень [3]. Водночас у сучасних ІТ-проектах часто виникає потреба не лише оцінити, а й оптимізувати ймовірність своєчасного завершення — наприклад, шляхом модифікації послідовності задач, перерозподілу ресурсів чи мінімізації дисперсії на

критичних шляхах. Це вимагає поєднання методів PERT з елементами математичного моделювання та оптимізації [6].

Метою цієї статті є аналіз підходів до оцінки ймовірності завершення ІТ-проєкту у заданий термін із застосуванням методу PERT, а також формулювання оптимізаційної задачі щодо мінімізації ризику невчасного завершення. Запропоноване дослідження орієнтоване на практичне застосування у сфері програмної інженерії, менеджменту проєктів та системного планування в умовах невизначеності.

**Теоретичні основи методу PERT.** Метод PERT (Program Evaluation and Review Technique) був розроблений у 1950-х роках у рамках програми ВМС США для управління складними проєктами з високим ступенем невизначеності [3, 4, 5]. Основна особливість методу полягає у використанні ймовірнісного підходу до оцінювання тривалості робіт, що відрізняє його від традиційних детермінованих методів планування, таких як СРМ (Critical Path Method).

### 1. Оцінка тривалості робіт

На відміну від класичного підходу, в якому кожній роботі надається одна оцінка тривалості, в методі PERT використовуються три експертні оцінки. Для кожного завдання  $i$  задано три оцінки тривалості:

–  $a_i$  — оптимістична оцінка — найкоротший можливий час виконання  $i$ -ї роботи за умови відсутності проблем;

–  $m_i$  — найбільш ймовірна оцінка — найімовірніша тривалість  $i$ -ї роботи за нормальних умов;

–  $b_i$  — песимістична оцінка — найдовша тривалість виконання  $i$ -ї роботи у разі виникнення труднощів.

На основі цих оцінок розраховується середнє очікуване значення тривалості  $i$ -ї роботи:

$$TE_i = \frac{a_i + 4m_i + b_i}{6}, \quad (1)$$

а також дисперсія (як міра ризику):

$$\sigma_i^2 = \left( \frac{b_i - a_i}{6} \right)^2. \quad (2)$$

Ці оцінки вважаються основою для побудови мережевого графа проєкту, в якому вузли представляють події, а дуги — роботи.

### 2. Критичний шлях і час виконання проєкту

У мережевій моделі обчислюється сукупність всіх можливих шляхів від початкової до завершальної події [5, 7]. Критичним шляхом (Critical Path) називається найдовший (за очікуваною тривалістю) шлях, який визначає мінімально можливу тривалість усього проєкту. Очікувана тривалість проєкту:

$$TE_{CP} = \sum_{i \in CP} TE_i, \quad (3)$$

де  $CP \subseteq \{1, \dots, n\}$  – множина робіт, що входять до критичного шляху.

Для цього шляху також обчислюється сумарна дисперсія:

$$\sigma_{CP}^2 = \sum_{i \in CP} \sigma_i^2. \quad (4)$$

### 3. Ймовірність вчасного завершення проєкту

Для визначення ймовірності завершення проєкту у заданий термін  $T$  використовується нормальний розподіл, за припущенням, що загальний розподіл тривалості критичного шляху наближається до нормального (за центральною граничною теоремою):

$$Z = \frac{T - TE_{CP}}{\sigma_{CP}}, \quad (5)$$

де:  $T$  — запланований термін завершення проєкту,  $TE_{CP}$  — очікувана тривалість критичного шляху,  $\sigma_{CP}$  — стандартне відхилення критичного шляху.

Тоді ймовірність своєчасного завершення проєкту дорівнює:

$$P(T) = \Phi(Z), \quad (6)$$

де  $\Phi(Z)$  — функція стандартного нормального розподілу.

### 4. Переваги та обмеження методу PERT

Метод PERT має низку суттєвих переваг, що роблять його ефективним інструментом управління складними ІТ-проєктами, особливо в умовах невизначеності, властивій дослідницьким або інноваційним ініціативам:

1) Урахування невизначеності в оцінках тривалості. На відміну від класичних підходів до планування, де використовуються лише фіксовані (детерміновані) значення тривалості, PERT дозволяє враховувати розкиданість можливих сценаріїв виконання кожної задачі. Це досягається шляхом використання трьох оцінок (оптимістичної, найбільш ймовірної та песимістичної), що забезпечує більш гнучке та реалістичне моделювання строків.

2) Ймовірнісна оцінка строків завершення проєкту. Завдяки використанню статистичних методів (зокрема, функції нормального розподілу), PERT дозволяє визначити ймовірність завершення проєкту у заданий термін. Це забезпечує основи для ризик-менеджменту та ухвалення рішень на основі даних, а не інтуїції.

3) Виявлення критичних завдань і контроль ризиків. Визначення критичного шляху в рамках методу дозволяє зосередити увагу на завданнях, що мають найбільший вплив на загальний термін виконання проєкту. Це дає змогу:

- оптимізувати розподіл ресурсів;
- контролювати найбільш ризикові точки;
- формувати план реагування у випадку відхилень.

4) Гнучкість у застосуванні до різних типів проєктів. Метод PERT є універсальним і може застосовуватись як до лінійних проєктів з чіткою послідовністю задач, так і до складних ітеративних або паралельних процесів, характерних для ІТ-сфери. Він добре інтегрується з іншими методами — зокрема, із CPM, Monte Carlo Simulation, Agile-оцінюванням.

5) Можливість використання для оптимізації. Завдяки аналітичній природі формул, метод PERT дозволяє не лише аналізувати строки, а й оптимізувати проект за певними критеріями — наприклад, мінімізувати дисперсію, максимізувати ймовірність завершення, зменшити навантаження на ресурси чи уникнути затримок.

6) Прийнятність для управлінських і технічних рішень. PERT створює спільне інформаційне поле для керівників, аналітиків та розробників, де рішення можуть бути обґрунтовані даними. Методика сприяє кращому розумінню часової структури проекту як з боку менеджменту, так і з боку виконавців.

Незважаючи на численні переваги, метод PERT має низку системних і практичних обмежень, які варто враховувати при його застосуванні в управлінні IT-проектами. Ці обмеження стосуються як теоретичних припущень, так і прикладних аспектів реалізації методу.

1) Суб'єктивність експертних оцінок. Метод PERT базується на експертному визначенні трьох оцінок тривалості для кожного завдання (a, m, b). Відсутність об'єктивних емпіричних даних або статистично обґрунтованих моделей може призводити до:

- упереджених або неточних оцінок;
- надмірного заниження чи завищення очікуваної тривалості;
- спотворення дисперсії та ризику.

Особливо це критично в нових або унікальних IT-проектах, де відсутні історичні дані.

2) Припущення про нормальність розподілу тривалості. PERT передбачає, що сукупна тривалість критичного шляху підпорядковується нормальному розподілу, що дозволяє застосовувати функцію Лапласа для обчислення ймовірності. Проте:

- на практиці це припущення не завжди виконується, особливо для невеликої кількості задач;
- реальні розподіли тривалості часто є асиметричними або мають тяжкі хвости;
- використання нормального розподілу може дати завищену впевненість у точності прогнозу.

3) Складність побудови та підтримки моделі.

У великих IT-проектах з сотнями залежностей та варіантів виконання побудова коректної PERT-моделі може бути:

- трудомісткою;
- важкою для візуалізації;
- чутливою до змін у структурі проекту.

Підтримка актуальності моделі при динамічних змінах (наприклад, при Agile-реалізації) потребує значних зусиль.

4) Обмежена підтримка паралельних та ітеративних процесів. Метод PERT, як і більшість мережевих методів, краще працює в послідовно структурованих проектах. У сучасних IT-проектах часто переважають:

- ітеративні підходи (Scrum, Kanban);
- паралельне виконання задач;

– гнучкі змінні вимоги.

PERT не завжди ефективно моделює такі умови без додаткової адаптації чи гібридних підходів.

5) Ігнорування ресурсних обмежень. Класичний PERT не враховує наявність ресурсних обмежень (наприклад, кількість розробників, серверів, бюджету). Це означає, що:

- модель може бути часово оптимальною, але нереалістичною;
- потрібне додаткове моделювання ресурсного навантаження (наприклад, через СРМ з обмеженнями або розширену PERT-COST модель).

6) Незначна точність для коротких проєктів або окремих етапів. Метод найкраще працює для великих та комплексних проєктів, де гранична теорема дозволяє припускати нормальність. Для коротких або лінійних етапів:

- функція нормального розподілу може не давати адекватних оцінок;
- оцінка ймовірності завершення може бути штучно завищеною або заниженою.

Таким чином, метод PERT залишається потужним інструментом для аналітичного управління проєктами в умовах невизначеності. Проте його застосування в ІТ-проєктах потребує усвідомлення його обмежень і часто — доповнення іншими підходами (Agile-практиками, ресурсними моделями, сценарним аналізом, машинним навчанням для точніших оцінок).

**Постановка задачі оптимізації ймовірності завершення проєкту за методом PERT.** У рамках методу PERT запропоновано формалізовану задачу, що дозволяє мінімізувати ймовірність несвоєчасного завершення ІТ-проєкту [3, 7, 8]. Основна ідея полягає в оптимізації структури проєкту або характеристик окремих задач таким чином, щоб зменшити ризик виходу за межі встановленого дедлайну.

Параметри задачі

- $T \in \mathbb{R}^+$  — запланований термін завершення проєкту (дедлайн);
- $TE_{CP} = \sum_{i \in CP} TE_i$  — очікувана тривалість критичного шляху;
- $\sigma_{CP}^2 = \sum_{i \in CP} \sigma_i^2$  — стандартне відхилення критичного шляху;
- $\Phi(Z)$  — функція стандартного нормального розподілу;
- $Z = \frac{T - TE_{CP}}{\sigma_{CP}}$  — Z-оцінка завершення проєкту в строк.

Цільова функція – мінімізувати ризик затримки:

$$\min \left( 1 - \Phi \left( \frac{T - \sum_{i \in CP} TE_i}{\sqrt{\sum_{i \in CP} \sigma_i^2}} \right) \right), \quad (7)$$

або альтернативне формулювання:

$$\max \left( \Phi \left( \frac{T - \sum_{i \in CP} TE_i}{\sqrt{\sum_{i \in CP} \sigma_i^2}} \right) \right). \quad (8)$$

Змінні оптимізації:

- тривалості задач  $a_i$ ,  $m_i$ ,  $b_i$  в межах допустимих варіантів (через управлінські рішення: автоматизація, зміна персоналу тощо);
- вибір структури мережі (альтернативні критичні шляхи, паралелізація задач);
- ресурсне навантаження (опосередковано впливає на  $TE_i$  та  $\sigma_i$ ).

Обмеження.

- Логічні зв'язки між задачами:

$$\text{якщо } i \rightarrow j, \text{ то } t_i^{end} \leq t_j^{start}. \quad (9)$$

- Обмеження на допустимі межі тривалості задач:

$$a_i^{\min} \leq a_i \leq a_i^{\max}, m_i^{\min} \leq m_i \leq m_i^{\max}, b_i^{\min} \leq b_i \leq b_i^{\max}. \quad (10)$$

- Фіксоване значення дедлайну  $T$ :

$$T = \text{плановий термін завершення}. \quad (11)$$

- Мережа проекту залишається ациклічною.

Формально, задача зводиться до максимізації ймовірності завершення проекту у строк (6). Зі зростанням  $Z$  — збільшується  $P(T)$ , отже, ми прагнемо:

- зменшити  $TE_{CP}$ : скорочення очікуваної тривалості,
- зменшити  $\sigma_{CP}$ : зниження ризику (дисперсії),
- або поєднати обидва впливи для максимізації функції  $\Phi(Z)$ .

**Обчислювальний експеримент.** З метою практичної перевірки ефективності запропонованого підходу було проведено обчислювальний експеримент на основі мережевої моделі умовного ІТ-проекту, що включає 9 основних задач (А–І) з визначеними трьома оцінками тривалості кожної задачі: оптимістичною  $a$ , найімовірнішою  $m$  та песимістичною  $b$ .

Вихідні дані подано у вигляді таблиці, що містить оцінки тривалості задач, обчислені значення очікуваної тривалості  $TE$  та дисперсії  $\sigma^2$ .

Мережевий граф проекту. На основі заданих залежностей між задачами було побудовано орієнтований граф (рис. 1), де вершини представляють задачі, а дуги - логічні зв'язки між ними. Початковим вузлом є подія «Start», а фінальним - «End».

Вихідні параметри задач ІТ-проєкту та розрахункові значення за методом PERT

Задача	$a$	$m$	$b$	$TE$	$\sigma^2$
A	2	4	6	4.00	0.4444
B	1	3	5	3.00	0.4444
C	2	3	4	3.00	0.1111
D	3	5	7	5.00	0.4444
E	1	2	3	2.00	0.1111
F	2	3	5	3.17	0.2500
G	2	4	6	4.00	0.4444
H	1	2	4	2.17	0.2500
I	3	4	5	4.00	0.1111

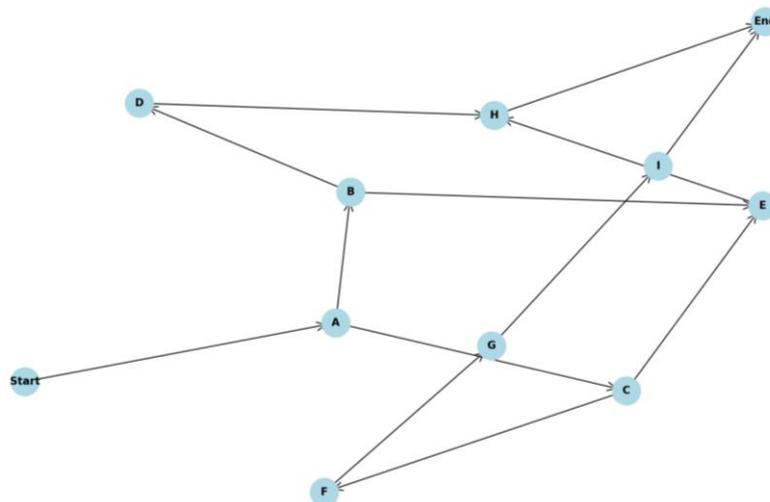


Рисунок 1 – Мережевий граф ІТ-проєкту

Основні маршрути виконання:

- Шлях 1: Start → A → B → D → H → End
- Шлях 2: Start → A → C → F → G → I → End
- Шлях 3: Start → A → B → E → H → End

Для кожного шляху обчислено сумарну очікувану тривалість та дисперсію.

Визначення критичного шляху на основі обчислених тривалостей:

Шлях 1 (A–B–D–H):

$$TE = 4.0 + 3.0 + 5.0 + 2.17 = 14.17,$$

$$\sum \sigma^2 = 0.4444 + 0.4444 + 0.4444 + 0.25 = 1.5832.$$

Шлях 2 (A–C–F–G–I):

$$TE = 4.0 + 3.0 + 3.17 + 4.0 + 4.0 = 18.17,$$

$$\sum \sigma^2 = 0.4444 + 0.4444 + 0.4444 + 0.25 = 1.5832.$$

Шлях 3 (A–B–E–H):

$$TE = 4.0 + 3.0 + 2.0 + 2.17 = 11.17,$$

$$\sum \sigma^2 = 0.4444 + 0.4444 + 0.1111 + 0.25 = 1.2499.$$

Критичний шлях:  $A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow I$

Очікувана тривалість проєкту ( $TE$ ): 18.17

Сумарна дисперсія ( $\sigma_{CP}^2$ ): 1.3610

Стандартне відхилення:

$$\sigma_{CP} = \sqrt{1.3610} \approx 1.166.$$

Обчислення ймовірності завершення проєкту. Нехай проєкт має бути завершений за 20 днів:

$$Z = \frac{20 - 18.17}{1.166} \approx 1.58,$$

$$P(T \leq 20) = \Phi(1.58) \approx 0.9429.$$

Ймовірність завершення проєкту в строк становить  $\sim 94.3\%$ .

В таблиці 2 надана інтерпретація отриманих результатів.

Таблиця 2

Рекомендації щодо оптимізації критичного шляху A–C–F–G–I

Аспект	Опис / Пропозиція
Критичний шлях	$A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow I$ (загальна очікувана тривалість 18.17 днів)
Ключові задачі для впливу	Задачі F, G та I, що суттєво впливають на тривалість і ризик
Мета оптимізації	Підвищення ймовірності завершення проєкту до жорсткішого дедлайну (наприклад, 17 днів)
Шлях 1: Зменшення дисперсій	Оптимізувати задачі F та G шляхом стандартизації виконання
Шлях 2: Скорочення очікуваної тривалості	Переглянути реалізацію задач (спрощення, автоматизація, делегування)
Шлях 3: Альтернативні ресурси	Використання досвідченіших виконавців, зовнішніх сервісів або паралельне виконання

На рисунку 2 показано функцію нормального розподілу для тривалості проєкту з очікуваним значенням 18.17 днів та стандартним відхиленням 1.166. Зафарбована область ліворуч від вертикальної червоної лінії відображає ймовірність завершення проєкту до нового дедлайну — 17 днів.

Таким чином, ймовірність завершення проєкту до 17 днів становить приблизно 15.78% (тобто ризик затримки — понад 84%). Це вказує на те, що при дедлайні в 17 днів проєкт майже напевно не буде завершено вчасно, якщо не здійснити оптимізацію критичного шляху.

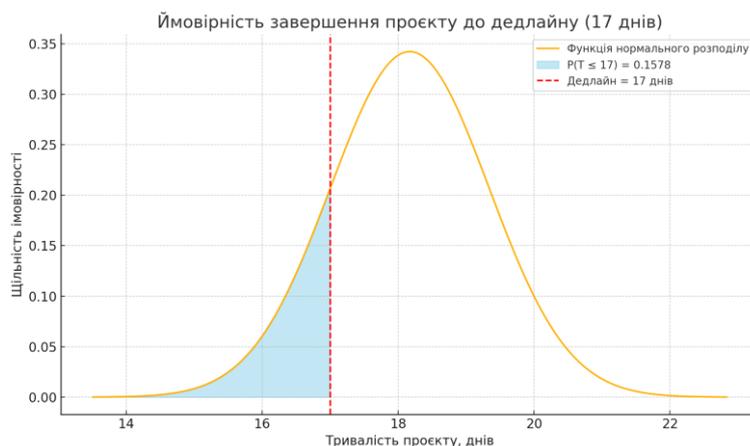


Рисунок 2 – Функція нормального розподілу тривалості проєкту з областю ймовірного завершення до 17 днів

Оптимізація критичного шляху проєкту. З метою підвищення ймовірності завершення ІТ-проєкту у більш стислий термін (наприклад, 17 днів) було проведено оптимізацію критичного шляху, визначеного в попередньому розділі як  $A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow I$ . Оптимізаційні дії були спрямовані на зменшення очікуваної тривалості окремих задач та скорочення їх дисперсії (невизначеності), що безпосередньо впливає на функцію ймовірності завершення проєкту.

У рамках обчислювального експерименту було змінено параметри двох задач, які мали найбільший вплив на загальну тривалість і ризик:

- для задачі F зменшено найбільш ймовірну тривалість з 3 до 2.5 днів, а максимальну — з 5 до 4 днів;
- для задачі G зменшено найбільш ймовірну тривалість з 4 до 3.5 днів, а максимальну — з 6 до 5 днів.

Ці зміни відображають реальні управлінські заходи, такі як автоматизація завдань, залучення досвідченішого персоналу, стандартизація процесів або усунення джерел затримок.

Після внесених змін:

- сумарна очікувана тривалість критичного шляху зменшилася до 17.17 днів;
- сумарна дисперсія скоротилася до 1.0277;
- ймовірність завершення проєкту до дедлайну в 17 днів зросла з 15.78% до 43.34%.

Таким чином, навіть незначне цілеспрямоване коригування параметрів задач критичного шляху дозволяє суттєво знизити ризик затримки та підвищити надійність реалізації проєкту у встановлені строки. Застосування PERT у поєднанні з параметричною оптимізацією дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо розподілу ресурсів, сценаріїв реалізації задач та управління ризиками.

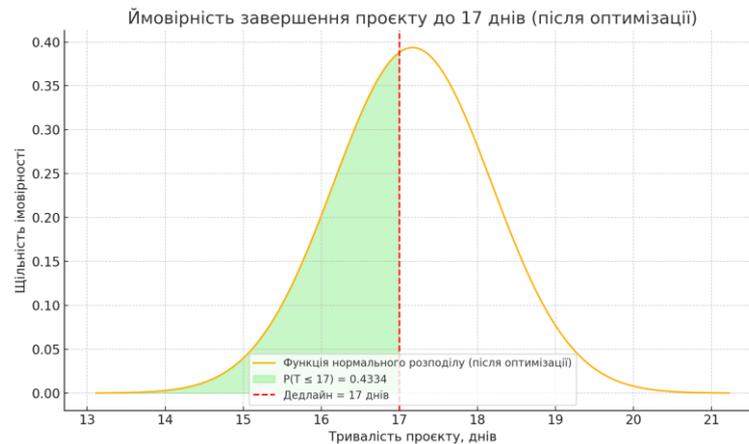


Рисунок 3 – Функція нормального розподілу тривалості проекту після оптимізації критичного шляху

Для наочної інтерпретації результатів оптимізації критичного шляху побудовано графік функції нормального розподілу тривалості проекту після застосування змін до задач F та G. Розрахункове значення очікуваної тривалості зменшилося з 18.17 до 17.17 днів, а стандартне відхилення – з 1.166 до приблизно 1.014. Це суттєво вплинуло на функцію ймовірності завершення проекту у заданий термін.

Як видно з графіка, площа під кривою зліва від вертикальної червоної лінії (дедлайн 17 днів) значно зростає. Ймовірність своєчасного завершення проекту зростає з 15.78% до 43.34%, що підтверджує ефективність точкових управлінських втручань у задачі критичного шляху.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження доведено ефективність застосування методу PERT для аналізу строків реалізації IT-проектів в умовах невизначеності. Запропоновано підхід, що поєднує класичний розрахунок очікуваної тривалості та дисперсії із формалізованою постановкою задачі оптимізації — мінімізації ризику невчасного завершення. На основі обчислювального експерименту з використанням реального мережевого графа проекту: визначено критичний шлях, обчислено ймовірність завершення проекту у заданий термін, проаналізовано вплив окремих задач на загальну надійність графіка виконання. Після оптимізації параметрів критичних задач (зменшення ймовірної тривалості та зниження дисперсії) ймовірність завершення проекту до дедлайну зростає з 15.78% до 43.34%. Це підтверджує, що навіть локальні втручання в структуру PERT-мережі можуть істотно підвищити ефективність управління строками.

Перспективи подальших досліджень передбачають розширення моделі на багаторівневі або адаптивні проекти [6, 8], а також інтеграцію з методами машинного навчання для автоматизованого аналізу ризиків та рекомендацій щодо оптимізації.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Костюченко, О. М. Управління IT-проектами: навч. посіб. / О. М. Костюченко. – Київ: КНЕУ, 2018. – 250 с.
2. Крук, О. Б. Управління проектами: теорія і практика: підручник / О. Б. Крук. – Львів: Новий Світ – 2000, 2020. – 312 с.
3. Kerzner, H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling / Harold Kerzner. – 12th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2017. – 928 p.
4. PMBOK® Guide – A Guide to the Project Management Body of Knowledge. – 7th ed. – Project Management Institute, 2021. – 370 p.
5. Moder, J. J., Phillips, C. R., Davis, E. W. Project Management with CPM, PERT, and Precedence Diagramming / J. J. Moder, C. R. Phillips, E. W. Davis. – 3rd ed. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1983. – 684 p.
6. Яковенко, І. О. Методи і моделі управління проектами в IT / І. О. Яковенко // Вісник ХНУ. Серія: економічні науки. – 2021. – № 4(54). – С. 110–116.
7. Golenko-Ginzburg, D. Project duration estimations with uncertain activity durations: PERT reconsidered / D. Golenko-Ginzburg // International Journal of Production Economics. – 1988. – Vol. 55. – P. 223–229. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00045-2)
8. Bhandari, S. Performance analysis of PERT and CPM techniques for project time management / S. Bhandari, R. Tomar // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 45. – P. 3014–3019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.750>

**REFERENCE**

1. Kostiuchenko, O. M. Upravlinnia IT-proiektamy: navchalnyi posibnyk [IT Project Management: Textbook]. Kyiv: KNEU, 2018. 250 p.
2. Kruk, O. B. Upravlinnia proiektamy: teoriia i praktyka [Project Management: Theory and Practice]. Lviv: Novyi Svit – 2000, 2020. 312 p.
3. Kerzner, H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. 12th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2017. 928 p.
4. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7th ed. PMI, 2021. 370 p.
5. Moder, J. J., Phillips, C. R., Davis, E. W. Project Management with CPM, PERT, and Precedence Diagramming. 3rd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983. 684 p.
6. Yakovenko, I. O. Metody i modeli upravlinnia proiektamy v IT [Methods and Models for Managing Projects in IT]. Visnyk KhNU. Serii: Ekonomichni nauky, 2021, No. 4(54), pp. 110–116.
7. Golenko-Ginzburg, D. Project duration estimations with uncertain activity durations: PERT reconsidered. International Journal of Production Economics, 1988, Vol. 55, pp. 223–229. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00045-2)
8. Bhandari, S., Tomar, R. Performance analysis of PERT and CPM techniques for project time management. Materials Today: Proceedings, 2021, Vol. 45, pp. 3014–3019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.750>

Received 23.06.2025.  
Accepted 26.06.2025.

***Estimation and optimization of IT project completion probability using the PERT method***

*This article explores the application of the PERT (Program Evaluation and Review Technique) method for assessing and optimizing the probability of on-time completion of IT projects under uncertainty. In IT project management, dealing with ambiguous time estimates is a persistent challenge. The PERT method provides a probabilistic approach to modeling project durations by using three time estimates for each activity: optimistic, most likely, and pessimistic. This allows for the calculation of both the expected duration and the variance of each task, as well as for the entire project. Based on these parameters, it becomes possible to estimate the probability of completing the project within a specified deadline by using the properties of the normal distribution.*

*The article offers a formal problem statement for minimizing the risk of project delay. The goal is to increase the likelihood of on-time completion by optimizing critical path activities—either by reducing the expected duration or decreasing the variance (i.e., stabilizing the execution). A computational experiment is conducted using a sample network model of a project consisting of nine interrelated tasks. The critical path is identified, and the project's completion probability is evaluated for a defined deadline.*

*Subsequently, the parameters of two critical tasks were modified to simulate managerial interventions, such as standardizing processes or reducing complexity. As a result, the overall project duration decreased from 18.17 to 17.17 days, and the probability of meeting the deadline increased significantly—from 15.78% to 43.34%. The visualization of the normal distribution before and after optimization clearly illustrates the improvement in project reliability.*

*The findings confirm the effectiveness of integrating PERT with mathematical modeling and optimization techniques in IT project planning. Even minor adjustments to the task parameters can lead to a substantial reduction in deadline risks. Future work may focus on developing automated tools for critical path adjustment using machine learning or multi-objective optimization methods.*

*Keywords: PERT, IT project, project duration, probability, optimization, critical path, variance, deadline.*

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, факультет прикладних комп'ютерних технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID 0000-0002-2470-6986.

**Мала Юлія Анатоліївна** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення, факультет інноваційних технологій, Університет митної справи та фінансів. ORCID: 0000-0002-2539-4793.

**Гуда Антон Ігорович** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри Інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій. ORCID 0000-0003-1139-1580

**Зеленцов Дмитро Гегемонович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інформаційних систем, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-5785-9858>

**Кокович Богдан Олександрович** – провідний фахівець, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. ORCID: 0009-0003-6714-3663

**Веровкін Олександр** – Публічне акціонерне товариство «Дніпроважмаш», Дніпро, Україна e-mail: alex1monya@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>

**Selivorstova Tatyana** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Information Technologies and Systems, Faculty of Applied Computer Technologies at Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID 0000-0002-2470-6986.

**Mala Yuliia** - PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Software Engineering, the University of Customs and Finance. ORCID: 0000-0002-2539-4793.

**Guda Anton** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID 0000-0003-1139-1580

**Zelenetsov Dmytro** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0002-5785-9858>

**Bohdan Oleksandrovych Kokovych** – Leading Specialist, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. ORCID iD: 0009-0003-6714-3663

**Verovkin Oleksandr** - Public joint stock company "Dniprovazhmash", Dnipro, Ukraine e-mail: alex1monya@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>

## РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ КАДРОВОГО ПЛАНУВАННЯ

*Анотація. Розвиток автоматизації бізнес-процесів, поряд зі зростанням складності управління людськими ресурсами, призвели до необхідності створення ефективних систем планування. У статті досліджується процес автоматизації кадрового планування та складання бюджету, що дозволяє керівникам переглядати та затверджувати річні плани, а лінійним керівникам - контролювати свою організацію, виявляти дефіцит кадрів та планувати набір персоналу. Крім того, система створює інформаційні панелі для менеджерів, що дозволяє відстежувати досягнення корпоративних цілей. Управління проектами є актуальним як для підвищення ефективності роботи команд, так і для оптимізації використання ресурсів. Крім багатьох видів комерційного використання, системи управління проектами становлять також інтерес у наукових дослідженнях та освітніх програмах, де вони допомагають організувати роботу над складними проектами та забезпечити досягнення поставлених цілей.*

*Вирішення проблеми управління проектами та планування людських ресурсів використовує досягнення та стимулює розвиток багатьох галузей техніки та менеджменту. Практична цінність дослідження полягає в тому, що воно допомагає зрозуміти ключові аспекти управління проектами та планування людських ресурсів в ІТ-компаніях, що сприяє підвищенню ефективності та продуктивності організацій.*

*При проведенні аналізу методів планування людських ресурсів, було досліджено ефективності різних методів планування людських ресурсів в ІТ-компаніях, впроваджено програмне забезпечення для автоматизації планування та розподілу ресурсів, проведено оцінку впливу планування ресурсів на продуктивність команд та оптимізовано використання людських ресурсів.*

*Впровадження розробленої системи управління проектами та методів планування людських ресурсів призводить до підвищення ефективності роботи команди та покращення результатів проектів. Рекомендовано застосовувати розроблені методи та інструменти для підвищення конкурентоспроможності ІТ-компаній.*

*Ключові слова: кадрове планування, автоматизація, бюджетування, управління людськими ресурсами, інформаційна панель.*

**Постановка задачі.** Розвиток інформаційних технологій, поряд з доступністю все більш потужних комп'ютерів та програмного забезпечення, привів до широкого використання систем управління проектами в ІТ-компаніях. У зв'язку з цим зростає інтерес

до поліпшення методів планування людських ресурсів, що є критично важливим для успішного виконання проектів.

Було визначено, що система управління проектами є комплексом методів, інструментів та процесів, які використовуються для планування, організації, керування та контролю проектів з метою досягнення визначених цілей у встановлені терміни, з дотриманням бюджету та якості. Основні завдання системи управління проектами включають планування, організацію, керування та контроль.

Планування людських ресурсів є стратегічним процесом, який допомагає організаціям забезпечити наявність потрібних людей з потрібними навичками в потрібний час, чим й зумовлена *актуальність* роботи. Основні етапи планування людських ресурсів включають сканування середовища, прогнозування попиту, аналіз пропозицій, аналіз прогалин, розробку HR-стратегії, реалізацію та моніторинг.

Особливості людських ресурсів у IT-галузі включають високу конкуренцію за таланти, швидкий розвиток технологій, гнучкі умови праці, культуру інновацій та високий рівень стресу. Ці фактори вимагають від IT-компаній розробки ефективних стратегій залучення та утримання співробітників, інвестування в навчання та розвиток, а також створення середовища, яке підтримує інновації та знижує рівень стресу. Професійний розвиток в IT-сфері є ключовим фактором для успішної кар'єри, оскільки технології постійно змінюються і вимагають від фахівців постійного оновлення знань та навичок. Кар'єра будь-якої людини складається з кількох ключових етапів, кожен з яких має свої особливості та виклики.

**Метою роботи** є розробка програмного продукту, який зможе ефективно управляти проектами та планувати людські ресурси в IT-компанії.

Для розробки програмного продукту були використані Visual Studio, SQL Server, мови програмування C#, T-SQL, JavaScript. Visual Studio є інтегрованим середовищем розробки, яке забезпечує зручні інструменти для написання, тестування та налагодження коду. SQL Server використовується для управління базами даних, що дозволяє зберігати та обробляти великі обсяги інформації. Мови програмування C#, T-SQL та JavaScript забезпечують гнучкість та ефективність розробки програмного забезпечення, дозволяючи створювати як серверні, так і клієнтські компоненти системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизація процесів управління людськими ресурсами є інноваційним підходом, який дозволяє досягти високої ефективності за рахунок використання єдиних стандартів та автоматизованих процесів. В останні роки такі системи стали важливим інструментом у сфері управління.

Процес автоматизації кадрового планування та складання бюджету є унікальним та ефективним підходом до управління людськими ресурсами. В ході аналізу останніх досліджень та публікацій [1-8] було визначено основні проблеми кадрового планування та їх рішення, які наведені в таблиці 1.

## Проблеми та їх рішення при автоматизації кадрового планування

Проблема	Вплив	Рішення
Компанії використовують різні інструменти для прогнозування розподілу персоналу	Процеси не уніфіковані	Уніфікований процес для визначення плану робочої сили компанії
Всі дані вводяться вручну або напівручну	Збирання та подання даних вимагає значних зусиль	Процес завантаження даних автоматизований
Відсутній детальний перегляд розподілу персоналу	Немає детальної видимості та передбачуваності розподілу персоналу	Рішення надає загальний статус підрозділів з можливістю деталізації

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Людські ресурси (HR) є одним з найважливіших активів будь-якої організації, особливо в ІТ-компаніях, де успіх проєктів значною мірою залежить від кваліфікації та ефективності команди. Планування людських ресурсів (HRP) є стратегічним процесом, який допомагає організаціям забезпечити наявність потрібних людей з потрібними навичками в потрібний час [1-5].

Основні етапи планування людських ресурсів:

1. Сканування середовища: Оцінка внутрішніх і зовнішніх факторів, які можуть вплинути на потреби в людських ресурсах. Це включає аналіз ринкових умов, галузевих тенденцій, правових вимог та технологічного прогресу.

2. Прогнозування попиту: Визначення майбутніх потреб в людських ресурсах на основі стратегічних цілей організації. Це може включати аналіз майбутніх проєктів, розширення бізнесу та інші фактори, що впливають на потребу в персоналі.

3. Аналіз пропозиції: Оцінка наявних людських ресурсів, включаючи навички, компетенції та потенціал співробітників. Це допомагає визначити, чи достатньо наявних ресурсів для задоволення майбутніх потреб.

4. Аналіз прогалин: Визначення розривів між поточними ресурсами та майбутніми потребами. Це дозволяє розробити стратегії для заповнення цих прогалин, такі як навчання, наймання нових співробітників або внутрішні переміщення.

5. Розробка HR-стратегії: Створення плану дій для задоволення майбутніх потреб в людських ресурсах. Це може включати програми навчання, стратегії найму, плани наступності та інші заходи.

6. Реалізація: Впровадження розроблених стратегій та моніторинг їх виконання. Важливо забезпечити, щоб всі заходи були узгоджені з загальною стратегією організації.

7. Моніторинг та оцінка: Постійний контроль за виконанням плану та оцінка його ефективності. Це дозволяє вчасно вносити корективи та забезпечувати відповідність плану реальним потребам організації.

Система автоматизації кадрового планування включає кілька ключових компонентів, що забезпечують ефективність її роботи:

1. Створення плану компанії: автоматизований процес побудови, затвердження та консолідації планів на рівні підрозділів.
2. Експорт завершеного плану: система дозволяє експортувати завершений план для подальшого використання.
3. Робоча дошка для планування: інтерактивний інструмент для детального планування та управління персоналом.
4. Інформаційні панелі: надають огляд важливої статистики та тенденцій.
5. Автоматичне виявлення невідповідностей: система виділяє суперечливі дані для їх корекції.

ІТ-галузь має свої специфічні особливості, які впливають на управління людськими ресурсами [2]:

1. Висока конкуренція за таланти: ІТ-компанії часто стикаються з дефіцитом кваліфікованих кадрів, що призводить до високої конкуренції за талановитих фахівців. Це вимагає від компаній розробки ефективних стратегій залучення та утримання співробітників.

2. Швидкий розвиток технологій: Постійний розвиток технологій вимагає від співробітників постійного навчання та підвищення кваліфікації. ІТ-компанії повинні інвестувати в навчання та розвиток своїх працівників, щоб залишатися конкурентоспроможними.

3. Гнучкі умови праці: Багато ІТ-компаній пропонують гнучкі умови праці, включаючи віддалену роботу та гнучкий графік. Це допомагає залучати таланти з різних регіонів та забезпечувати баланс між роботою та особистим життям.

4. Культура інновацій: ІТ-компанії часто мають культуру, яка сприяє інноваціям та творчому підходу до вирішення проблем. Це вимагає від HR-менеджерів створення середовища, яке підтримує та стимулює інновації.

5. Високий рівень стресу: Робота в ІТ може бути дуже стресовою через високі вимоги до продуктивності та швидкі темпи змін. Компанії повинні забезпечувати підтримку ментального здоров'я своїх співробітників та створювати умови для зниження стресу.

#### *Бізнес-можливості та огляд системи*

Проект включає процес автоматизації кадрового планування та складання бюджету, де він дозволить керівникам, віце-президентам, старшим віце-президентам і генеральним директорам переглядати річний кадровий план і бюджет і затверджувати їх.

З іншого боку, це дозволить лінійним керівникам планувати та контролювати свою організацію, тобто виявляти дефіцит кваліфікованих кадрів для заповнення критично важливих ролей, підкреслювати потреби в наборі персоналу та щоденно відстежувати кількість співробітників у порівнянні з існуючими посадами та посилювати контроль (фактичний порівняно з бюджетом). Система забезпечить фінанси необхідною для бюджету статистикою.

Крім того, система створюватиме зрозумілу інформаційну панель для менеджерів, пов'язану з корпоративними цілями, і повинна висвітлювати прогалини, якщо такі є.

Система надає можливість переглянути 10-річний план на будь-якому рівні в залежності від наданих доступів.

Загальну ідею можна описати кількома простими повторюваними кроками для початку створення планів компанії шляхом збору даних від відділів до компанії (рис.1).

Система планування людських ресурсів автоматизує такі процеси:

- Створення плану компанії шляхом послідовного процесу побудови, затвердження та консолідації планів на нижчих підрозділах
- Експорт завершеного плану

На кожному кроці планувальник виконує планування щодо виходу на пенсію, скорочення/оптимізації, перепризначення/переміщення, інтеграція, інтернатура, набір персоналу тощо.

В роботі розроблено математичну модель планування людських ресурсів, яка дозволяє ефективно прогнозувати та аналізувати попит на різні посади в організації. Система враховує численні параметри, зокрема кількість посад на рік та цикли планування. Ця модель використовує консолідовані метрики для забезпечення точності прогнозів, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо набору персоналу та розподілу ресурсів.

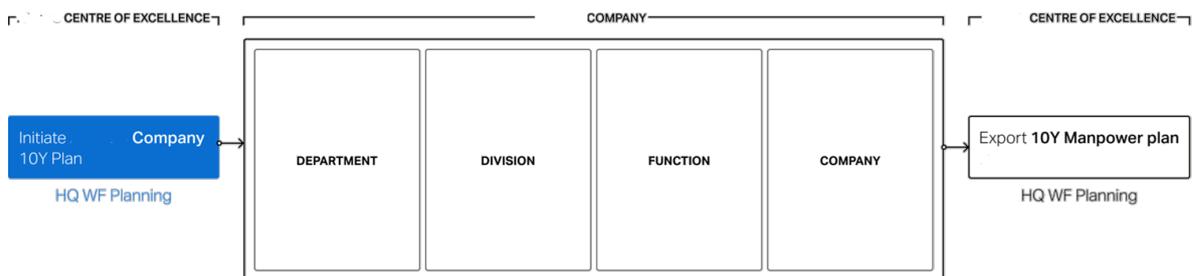


Рисунок 1 – Огляд системи

На рис. 2 наведено діаграму «Прогнози попиту», яка призначена для візуалізації та аналізу прогнозів попиту на посади в компанії. Вона надає інформацію про:

- Кількість посад на рік - дозволяє побачити загальну кількість позицій, які будуть потрібні в кожному році.
- Попередній і поточний цикл планування - відображає попередні прогнози та фактичні дані за поточний цикл планування. Це допомагає порівнювати очікувані результати з реальними.



Рисунок 2 – Прогнози попиту

Використання діаграми:

1. Стратегічне планування - допомагає керівництву приймати обґрунтовані рішення щодо набору персоналу на основі прогнозів попиту.
2. Розподіл ресурсів - забезпечує ефективний розподіл людських ресурсів між різними підрозділами компанії.
3. Оцінка ефективності - дозволяє оцінити, наскільки точно прогнози відповідають реальним даним, і коригувати стратегії планування на майбутнє.

На рис. 3 наведено діаграму «Вакансії», яка допомагає управлінцям і HR-фахівцям відстежувати та аналізувати стан вакантних посад і планувати заходи з їх заповнення, враховуючи минулі та поточні цикли планування. Це може сприяти більш ефективному використанню людських ресурсів і забезпеченню безперебійної роботи організації.



Рисунок 3 – Діаграма вакансій

Чисельне моделювання та результати. З рис. 4-5 можна проаналізувати як змінилась кількість позицій, в поточному плані в порівнянні з попереднім. Тобто, наприклад, був створений новий підрозділ в якому 10 працівників, план буде перебудований і на діаграмі ми побачимо різницю.

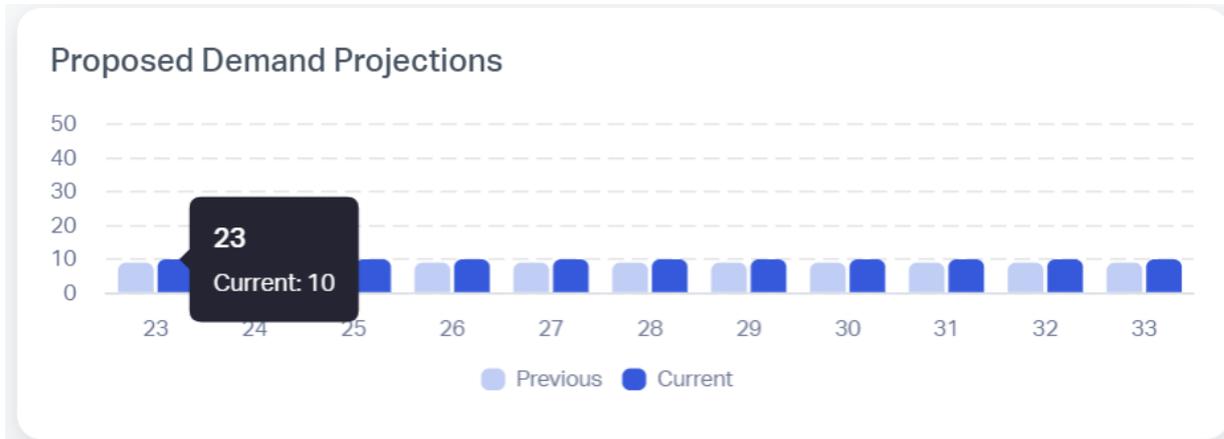


Рисунок 4 – Проекція попиту до створення нового підрозділу



Рисунок 5 – Проекція попиту після створення нових позицій

Це призведе до оновлення кількості вакансій (рис. 6-7). На рисунках 6-7 видно, що їх стало більше на 10.

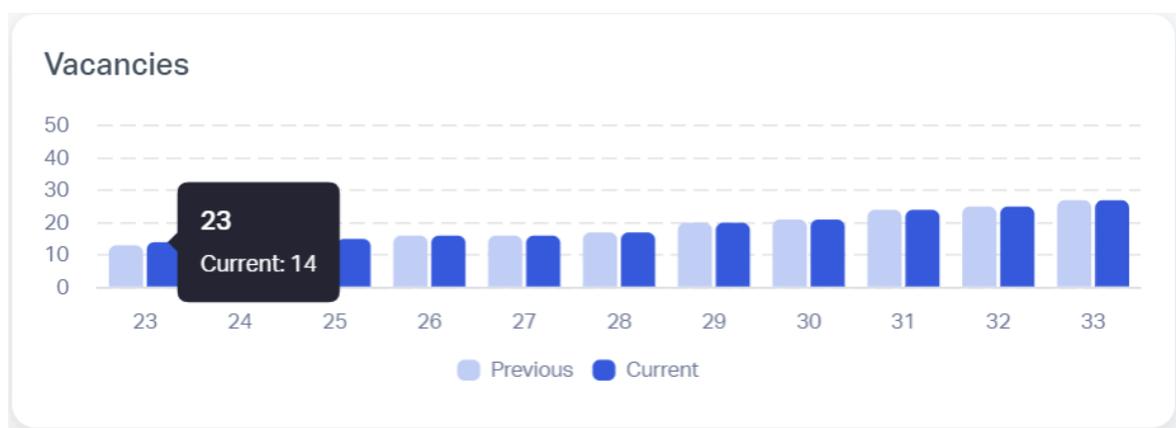


Рисунок 6 – Кількість вакансій початкова



Рисунок 7 – Кількість вакансій після створення нових позицій

Після того, як вакансії будуть закриватись, це буде відображатись також на цьому графіку.

В матриці проєкцій (рис. 8) по підрозділам можна побачити в якому саме підрозділі відбулись зміни і їх значення. На рис. 8 наведені початкові значення.

	2023	2024	2025	2026	2027
Proposed Demand	59 → 60	59 → 60	59 → 60	59 → 60	59 → 60
Company where Added 10 positions	15 → 15	15 → 15	15 → 15	15 → 15	15 → 15
Technical Division	28 → 29	28 → 29	28 → 29	28 → 29	28 → 29
Corporate Services Department	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2
Legal, Governance & Compliance Department	3 → 3	3 → 3	3 → 3	3 → 3	3 → 3
Finance Department	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2

Рисунок 8 – Зведена матриця за попередній і поточний цикл планування

Після розширення якогось підрозділу, наприклад першого, можна буде побачити в якому підрозділі і в якому році відбулись зміни. Крім того, це можна наглядно порівняти з попередніми циклами (рис. 9).

«Системні технології» 5 (160) 2025 «System technologies»

	2023	2024	2025	2026	2027
Proposed Demand	59 → <b>70</b>	59 → 60	59 → 60	59 → 60	59 → 60
Company where Added 10 positions	15 → <b>25</b>	15 → 15	15 → 15	15 → 15	15 → 15
Technical Division	28 → 29	28 → 29	28 → 29	28 → 29	28 → 29
Corporate Services Department	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2
Legal, Governance & Compliance Department	3 → 3	3 → 3	3 → 3	3 → 3	3 → 3
Finance Department	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2

Рисунок 9 - Зведена матриця за попередній і поточний цикл планування

Відповідно, це також вплине і на вакансії. Зміни будуть виділені іншим стилем рис. 10-11.

Зведена матриця вакансій за попередній і поточний цикл планування до розширення підрозділу наведена на рис. 10.

Vacancies	13 → 14	13 → 13	15 → 15	16 → 16	16 → 16
Company where Added 10 positions	4 → 15	4 → 5	4 → 5	4 → 5	4 → 5
Technical Division	4 → 5	4 → 5	5 → 6	6 → 7	6 → 7
Corporate Services Department	0 → 0	0 → 0	0 → 0	0 → 0	0 → 0
Legal, Governance & Compliance Department	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2
Finance Department	1 → 0	1 → 0	1 → 0	1 → 0	1 → 0

Рисунок 10 - Зведена матриця вакансій за попередній і поточний цикл планування до розширення підрозділі

Зведена матриця вакансій за попередній і поточний цикл планування, після розширення підрозділу наведена на рис. 11.

▼ Vacancies	13 → <b>24</b>	13 → 13	15 → 15	16 → 16	16 → 16
Company where Added 10 positions	4 → <b>25</b>	4 → 5	4 → 5	4 → 5	4 → 5
Technical Division	4 → 5	4 → 5	5 → 6	6 → 7	6 → 7
Corporate Services Department	0 → 0	0 → 0	0 → 0	0 → 0	0 → 0
Legal, Governance & Compliance Department	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2	2 → 2
Finance Department	1 → 0	1 → 0	1 → 0	1 → 0	1 → 0

Рисунок 11 - Зведена матриця вакансій за попередній і поточний цикл планування після розширення підрозділу

**Висновки.** В статті визначено, що система управління проектами є комплексом методів, інструментів та процесів, які використовуються для планування, організації, керування та контролю проектів з метою досягнення визначених цілей у встановлені терміни, з дотриманням бюджету та якості. Основні завдання системи управління проектами включають планування, організацію, керування та контроль.

Планування людських ресурсів є стратегічним процесом, який допомагає організаціям забезпечити наявність потрібних людей з потрібними навичками в потрібний час. Основні етапи планування людських ресурсів включають сканування середовища, прогнозування попиту, аналіз пропозиції, аналіз прогалин, розробку HR-стратегії, реалізацію та моніторинг.

Особливості людських ресурсів у IT-галузі включають високу конкуренцію за таланти, швидкий розвиток технологій, гнучкі умови праці, культуру інновацій та високий рівень стресу. Ці фактори вимагають від IT-компаній розробки ефективних стратегій залучення та утримання співробітників, інвестування в навчання та розвиток, а також створення середовища, яке підтримує інновації та знижує рівень стресу.

Практична цінність дослідження полягає в тому, що воно допомагає зрозуміти ключові аспекти управління проектами та планування людських ресурсів в IT-компаніях, що сприяє підвищенню ефективності та продуктивності організацій.

В результаті виконання роботи було розроблено програмний продукт, який зможе ефективно управляти проектами та планувати людські ресурси в IT-компанії. Для розробки програмного продукту були використані Visual Studio, SQL Server, мови програмування C#, T-SQL, JavaScript.

Впровадження математичного моделювання значно покращило точність прогнозів попиту на посади, що сприяло обґрунтованому прийняттю рішень щодо набору персоналу.

Використання діаграм дозволило наглядно відстежувати зміни в кількості вакантних посад та ефективність планування, що сприяло більш ефективному управлінню людськими ресурсами.

Моделювання виявило критичні підрозділи, які потребують додаткових ресурсів, дозволяючи оперативно реагувати на зміни та уникати дефіциту персоналу. Завдяки прогнозам і аналізу даних, організація змогла ефективно розподіляти ресурси між підрозділами, що забезпечило безперебійність роботи і досягнення стратегічних цілей. Періодичне оновлення моделі та включення нових параметрів дозволить підтримувати її актуальність та ефективність в умовах змінного ринку праці.

#### ЛІТЕРАТУРА

- 1 The Definitive Guide to Project Management. Nokes, Sebastian. 2nd Ed.n. London (Financial Times / Prentice Hall): 2007. ISBN 978-0-273-71097-4.
- 2 Paul C. Dinsmore et al (2005) The right projects done right! John Wiley and Sons, 2005. ISBN 0-7879-7113-8. p.35 and further.
- 3 Lewis R. Ireland (2006) Project Management. McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 0-07-147160-X. p.110.
- 4 Joseph Phillips (2003). PMP Project Management Professional Study Guide. McGraw-Hill Professional, 2003. ISBN 0-07-223062-2 p.354.
- 5 Dennis Lock (2007) Project management (9e ed.) Gower Publishing, Ltd., 2007. ISBN 0-566-08772-3.
- 6 Young-Hoon Kwak (2005). «A brief history of Project Management». In: The story of managing projects. Elias G. Carayannis et al. (9 eds), Greenwood Publishing Group, 2005. ISBN 1-56720-506-2.
- 7 David I. Cleland, Roland Gareis (2006). Global project management handbook. "Chapter 1: «The evolution of project management». McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 0-07-146045-4.
- 8 Martin Stevens (2002). Project Management Pathways. Association for Project Management. APM Publishing Limited, 2002 ISBN 1-903494-01-X p.xxii

#### REFERENCES

- 1 The Definitive Guide to Project Management. Nokes, Sebastian. 2nd Ed.n. London (Financial Times / Prentice Hall): 2007. ISBN 978-0-273-71097-4.
- 2 Paul C. Dinsmore et al (2005) The right projects done right! John Wiley and Sons, 2005. ISBN 0-7879-7113-8. p.35 and further.
- 3 Lewis R. Ireland (2006) Project Management. McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 0-07-147160-X. p.110.
- 4 Joseph Phillips (2003). PMP Project Management Professional Study Guide. McGraw-Hill Professional, 2003. ISBN 0-07-223062-2 p.354.
- 5 Dennis Lock (2007) Project management (9e ed.) Gower Publishing, Ltd., 2007. ISBN 0-566-08772-3.
- 6 Young-Hoon Kwak (2005). «A brief history of Project Management». In: The story of managing projects. Elias G. Carayannis et al. (9 eds), Greenwood Publishing Group, 2005. ISBN 1-56720-506-2.

7 David I. Cleland, Roland Gareis (2006). Global project management handbook. "Chapter 1: «The evolution of project management». McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 0-07-146045-4.

8 Martin Stevens (2002). Project Management Pathways. Association for Project Management. APM Publishing Limited, 2002 ISBN 1-903494-01-X p.xxii

Received 23.06.2025.

Accepted 26.06.2025.

### ***Implementation and research of methods for automation human resource planning***

*The development of business process automation, along with the increasing complexity of human resource management, has led to the need to create effective planning systems. The article examines the process of automating personnel planning and budgeting, which allows managers to review and approve annual plans, and line managers to control their organization, identify staff shortages and plan staff recruitment. In addition, the system creates information panels for managers, which allows you to track the achievement of corporate goals.*

*Project management is relevant both for increasing the efficiency of teams and for optimizing the use of resources. In addition to many types of commercial use, project management systems are also of interest in scientific research and educational programs, where they help organize work on complex projects and ensure the achievement of set goals.*

*Solving the problem of project management and human resource planning uses the achievements and stimulates the development of many branches of technology and management. The practical value of the study is that it helps to understand the key aspects of project management and human resource planning in IT companies, which contributes to increasing the efficiency and productivity of organizations.*

*When analyzing human resource planning methods, the effectiveness of various human resource planning methods in IT companies was investigated, software was implemented to automate planning and resource allocation, the impact of resource planning on team productivity was assessed, and human resource use was optimized.*

*The implementation of the developed project management system and human resource planning methods leads to increased team efficiency and improved project results. It is recommended to apply the developed methods and tools to increase the competitiveness of IT companies.*

*Keywords: personnel planning, automation, budgeting, human resources management, dashboard.*

**Журба Анна Олексіївна** - доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «Дніпропетровський металургійний інститут» УДУНТ.

**Шилін Андрій** – студент спеціальності 122 Комп’ютерні науки, Український державний університет науки та технологій. Навчально-науковий інститут «Дніпропетровський металургійний інститут».

**Zhurba Anna** - assistant professor, Department of information technology and systems, Educational and Scientific Institute "Dnipropetrovsk Metallurgical Institute", Ukrainian state university of science and technologies.

**Shilin Andrii** - student, specialty 122 Computer Science, Ukrainian State University of Science and Technology. Educational and Scientific Institute "Dnipropetrovsk Metallurgical Institute".

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

**Молодець Б.В., Булана Т.М.,  
Болдирєв Д.О.**

Інформаційна система генерації  
погодних умов на основі штучного  
інтелекту для технічних систем  
підтримки прийняття рішень

3

**Molodets B., Bulana T.,  
Boldyriev D.**

Analysis of existing architectures for  
the development of an information  
system of air quality assessment

3

**Зародюк А.В., Ліхоузова Т.А.**

Аналіз наукових і практичних  
досягнень у сфері генерації  
ревербераційних ефектів

11

**Zarodiuk A.V., Likhouzova T.A.**

Analysis of scientific and practical  
achievements in the sphere of  
reverberation effects generation

11

**Клименко О.Д.**

Перевірка однорідності псевдо-  
випадкових вибірок критеріями  
Андерсона та Буша-Вінда

24

**Klymenko O.D.**

Verification of homogeneity of  
pseudorandom samples by Anderson  
and Bush-Wind criteria

24

**Мовчан О.Ю.**

Удосконалені моделі пластичності з  
урахуванням руйнування та стратегії  
калібрування для точного  
скінченно-елементного аналізу  
бетону без армування у тонкостінних  
конструкціях

34

**Movchan Oleksandr**

Advanced damage plasticity modelling  
and calibration strategies for accurate  
finite element analysis of unreinforced  
concrete in thin-walled structures

34

**Григорович М.С.**

Виявлення дефектів плоских  
покрівель за допомогою методів  
машинного навчання та глибокого  
навчання

43

**Hryhorovych M.**

Detecting flat roof defects with ma-  
chine learning and deep learning tech-  
niques

43

**Бахрушин О.В., Бахрушин В.Є.**

Застосування засобів штучного  
інтелекту для пошуку та  
попереднього аналізу даних у при-  
кладних дослідженнях освітніх  
систем

50

**Bakhrushyn O., Bakhrushyn V.**

Application of artificial intelligence  
tools for data search and preliminary  
analysis in applied research of  
educational systems

50

<b>Поворотня І.Р., Сафронова О.А., Подольський Р.В., Кононенко Г.А.</b> Оптимальні параметри Mn/Si для коригування механічних властивостей сталі для залізничних осей	58	<b>Povorotnya I.R., Safronova O.A., Podolskyi R.V., Kononenko G.A.</b> Optimal Mn/Si parameters for adjusting the mechanical properties of steel for railway axles	58
<b>Польовий О.Б., Редчиць Д.О.</b> Чисельне моделювання взаємодії стрибка ущільнення з надзвуковим ламінарним примежовим шаром за наявністю тепломасообміну з поверхнею	69	<b>Polevoy O.B., Redchyts D.O.</b> Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a supersonic laminar boundary layer in the presence of heat and mass exchange with the surface	69
<b>Суковенко К.Г.</b> Інформаційна технологія для підтримки рішень у сфері відеоспостереження	84	<b>Sukovenko K.</b> Information technology for decision support in the field of video surveillance	84
<b>Зінченко М.Д., Потап О.Ю., Бурчак А.А., Михайловський М.В., Шибакінський В.І., Іванова Л.Х.</b> Дослідження процесу різання сортового прокату на рейкобалочних та великосортних станах	92	<b>Zinchenko M.D., Potap O.Yu., Burchak A.A., Mykhailovskyi M.V., Shybakinskyi V.I., Yvanova L.</b> Research of the process of cutting long rolled steel on rail-beam and large-section mills	92
<b>Федоренко О.Д., Клим В.Ю., Клименко С.В.</b> Непараметрична статистика випадкових величин з невідомими функціями розподілу ймовірностей	101	<b>Fedorenko O.D., Klym V.Y., Klymenko S.V.</b> Nonparametric statistics of random variables with unknown probability distribution function	101
<b>Трипутень М., Кузнецов В., Іванова Л.Х.</b> Адаптація предикатної моделі в задачах керування нестационарними статичними об'єктами	112	<b>Tryputen M., Kuznetsov V., Yvanova L.</b> Adaptation of a predicate model in control problems of nonstationary static objects	112
<b>Тонкошкур І.С.</b> Чисельний аналіз аеродинамічних характеристик некругових конусів	128	<b>Tonkoshkur I.S.</b> Numerical analysis of aerodynamic characteristics of non-circular cones	128

при надзвуковому обтіканні		during supersonic flow	
<b>Кобзар В.І.,</b>		<b>Kobzar V.I.,</b>	
<b>Кривенко О.Ю., Пікільняк А.В.</b>		<b>Kryvenko O.Yu., Pikilniak A.V.</b>	
Оптимізація параметрів		Optimization of hydrotransport system	
гідротранспортних систем з		parameters taking into account	
урахуванням критеріїв надійності	136	reliability criteria	136
<b>Краснюк М.А., Гнатушенко Вік.В.,</b>		<b>Krasnyuk M., Hnatushenko Vik.,</b>	
<b>Мороз Б.І., Сокол В.Р.</b>		<b>Moroz B., Sokol O.</b>	
Розробка автоматизованої системи		Development of an automated	
центру авторизації	147	authorization center system	147
<b>Островська К.Ю., Носов В.О.</b>		<b>Ostrovska K.Y., Nosov V.O.</b>	
Методи машинного навчання для		Machine learning methods for	
антифрод-систем	156	antifraud systems	156
<b>Кавац О.О., Кавац Ю.В.,</b>		<b>Kavats O.O., Kavats Y.V.,</b>	
<b>Сергєєва К.Л., Рой Д.М.</b>		<b>Sergieieva K.L., Roi D.M.</b>	
Аналіз методик автоматизованого		Analysis of automated mapping	
картування змін водойм	164	techniques for changes in water bodies	164
<b>Клевцов М.К., Рудакова Г.В.</b>		<b>Klevtsov M.K., Rudakova G.V.</b>	
Оптимізація розкрою листового		Optimization of sheet paper cutting for	
паперу для потреб поліграфічного		the needs of printing production	
виробництва	172		172
<b>Ведмідь В.В., Нестеренко Т.М.,</b>		<b>Vedmid V.V., Nesterenko T.M.,</b>	
<b>Нестеренко М.М., Пирлик М.О.</b>		<b>Nesterenko M.M., Pyrlyk M.O.</b>	
Експериментальні дослідження		Experimental studies of a combined	
комбінованої імпульсно-вібраційної		impulse-vibration installation	
установки	178		178
<b>Стрельбіцький В.В.</b>		<b>Strelbitskyi V.V.</b>	
Дослідження зносу шин портових		Research of tire wear on port container	
контейнерних напівпричепі	189	semi-trailers	189
<b>Селівьорстова Т.В., Мала Ю.В.,</b>		<b>Seliviorstova T.V., Mala Yu.V.,</b>	
<b>Гуда А.І., Зеленцов Д.Г.,</b>		<b>Huda A.I., Zelenetsov D.,</b>	
<b>Кокович Б.О., Веровкін О.</b>		<b>Kokovych B.O., Verovkin O.</b>	
Оцінка та оптимізація ймовірності		Estimation and optimization of IT	
завершення ІТ-проєкту за методом		project completion probability using	
PERT	198	the PERT method	198
ISSN 1562-9945 (Print)			225
ISSN 2707-7977 (Online)			

**Шилін А.А., Журба А.О.**

Реалізація та дослідження методів  
автоматизації кадрового планування

211

**Shilin A., Zhurba A.**

Implementation and research of  
methods for automating human  
resource planning

211

РЕФЕРАТИ

УДК 004.021

Молодець Б.В., Булана Т.М., Болдирев Д.О. **Інформаційна система генерації погодних умов на основі штучного інтелекту для технічних систем підтримки прийняття рішень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.3 – 10.

Робота присвячена розробці інформаційної технології моделювання погоди, застосуванням глибокого навчання в задачах прогнозування атмосферних явищ. В якості моделі було обрано FourCastNet з високоефективною обробкою геофізичних даних, яка дала можливість навчатися на великих масивах історичної метеорологічної інформації та забезпечила оперативне прогнозування з високою просторовою роздільною здатністю.

Бібл. 11.

УДК 004.043

Зародюк А.В., Ліхоузова Т.А. **Аналіз наукових і практичних досягнень у сфері генерації ревербераційних ефектів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.11 – 23.

У роботі розглянуто проблему створення реалістичних звукових ефектів реверберації в комп'ютерних іграх. Показано основні особливості існуючих методів генерації реверберації, серед яких складність ручної обробки параметрів звуку, статичність моделей та обмежена адаптивність до геометрії ігрового простору. Визначено, що проблема створення реалістичних ревербераційних ефектів для комп'ютерних ігор є досяжною лише при застосуванні сучасних підходів, що зменшують ручне налаштування та підвищують адаптивність звукових параметрів. На підставі аналізу визначено, що існують значні перешкоди, які знижують реалістичність акустичного супроводу доступними методами.

Бібл. 20.

УДК 623.618.2

Клименко О.Д. **Перевірка однорідності псевдовипадкових вибірок критеріями Андерсона та Буша-Вінда** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.24 – 33.

У статті розглянуто питання статистичної однорідності псевдовипадкових величин. Метою дослідження є оцінка ефективності двох критеріїв: двох вибіркового критерію Андерсона та комбінованого критерію Буша-Вінда. Досліджено можливості критеріїв щодо виявлення статистично значущих відмінностей між вибірками, особливо у випадках, коли одна з вибірок містить "забруднені" дані (вибірки Тьюкі). Критерій Андерсона заснований на аналізі рангових характеристик вибірок, що дозволяє оцінити їх однорідність за умов невідомого розподілу. Натомість комбінований критерій Буша-Вінда є універсальним і здатен аналізувати вибірки з різними розподілами, враховуючи як середні значення, так і дисперсії. Практична цінність дослідження полягає у визначенні оптимальних умов використання кожного з критеріїв для різних за розміром вибірок та з невідомими статистичними параметрами. Використання зазначених кри-

теріїв ефективно застосовувати при дослідженні малих вибірок ( $n \leq 60$ ). Визначено, що доцільно комбінувати статистичні критерії з методами очищення даних або використувати робастні аналоги. Отримані результати можуть бути застосовані в експериментальній фізиці, соціології, інженерії, біомедичних дослідженнях та інших сферах, де важливо оцінити однорідність експериментальних даних.

Бібл. 7, Іл. 4, Табл. 3.

УДК 004.94, 624.9, 692

**Мовчан О.Ю. Удосконалені моделі пластичності з урахуванням руйнування та стратегії калібрування для точного скінченно-елементного аналізу бетону без армування у тонкостінних конструкціях // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.34 – 42.**

Запропоновано узагальнену методику високоточного скінченно-елементного моделювання неармованого бетону в тонкостінних елементах. Ключовими складниками є пошкоджено-пластичні закони матеріалу, детальна калібрувальна послідовність на основі випробувань на стиск, розтяг і розкол, а також уточнене сіткування з нелокальною регуляризацією для усунення залежності від розміру елемента. Показано, що коректно відкалібрована модель Concrete Damaged Plasticity відтворює криві «навантаження–прогин» і карти тріщин із похибкою менше 15 %. Окреслено потребу у відкритих еталонних базах даних і застосуванні машинного навчання для автоматизації підбору параметрів.

Бібл. 11, іл. 0, табл. 0.

УДК 004.8, 004.93, 624.042.7, 692.5

**Григорович М.С. Виявлення дефектів плоских покрівель за допомогою методів машинного навчання та глибокого навчання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.43 – 49.**

У статті подано структурований огляд сучасних методів глибокого навчання - згорткових нейронних мереж (CNN), семантичної сегментації (U-Net, DeepLab, TransUNet), виявлення об'єктів (YOLO, Faster R-CNN) та автокодерів - для діагностики конструктивних дефектів, з акцентом на плоскі покрівлі. Основними джерелами даних є RGB та ІЧ-зображення, отримані з дронів, що дає змогу проводити дистанційний огляд важкодоступних зон. Показано, що точність виявлення тріщин, відшарування або зволоження перевищує 85 %. У таблиці порівняно ефективність моделей для різних елементів конструкцій. Реальні кейси підтверджують можливість інтеграції ШІ-інструментів у практику технічного обслуговування. Висвітлено проблеми, зокрема нестачу даних та узагальнення моделей, а також рекомендовано мультиспектральну аналітику та цифрові двійники як напрями подальших досліджень.

Бібл. 10, іл. 1, табл. 1.

УДК 004.8 + 311.2

**Бахрушин О.В., Бахрушин В.Є. Застосування засобів штучного інтелекту для пошуку та попереднього аналізу даних у прикладних дослідженнях освітніх систем**

// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.50 – 57.

Розглянуто проблеми застосування популярних інструментів штучного інтелекту GROK 3 та ChatCPT 4 для збирання наявних в інтернет даних про освітні системи, їх попередньої обробки й аналізу. Показано, що обидва інструменти дають змогу істотно прискорити і спростити виконання рутинних етапів досліджень. При цьому GROK 3 наводить більш повні, надійні і якісні дані, які загалом є близькими до аналогічних даних інших джерел. Тому його використання для розв'язання задач розглянутого класу може бути корисним при проведенні досліджень освітніх систем і розробленні освітніх політик.

Бібл. 8, іл. 2.

УДК 627.63. 632.81.618.83

Поворотня І.Р., Сафронова О.А., Подольський Р.В., Кононенко Г.А. **Оптимальні параметри Mn/Si для коригування механічних властивостей сталі для залізничних осей** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.58 – 68.

У роботі представлено підхід до оптимізації складу сталі на основі спрямованого хімічного зв'язку. Метод враховує взаємодії між елементами на міжатомному рівні, що критично для прогнозування властивостей матеріалу. Основна увага приділяється впливу вмісту вуглецю, кремнію та марганцю на зарядовий стан системи через параметр ZY. Встановлено, що для підвищення твердості слід змінювати співвідношення Mn/Si: до значення 2,8–3,2 перевага за кремнієм, після — за марганцем. Контроль легувальних елементів дозволяє створювати сталі з прогнозованими властивостями.

Бібл. 7, іл. 8.

УДК 532.516

Польовий О.Б., Редчиць Д.О. **Чисельне моделювання взаємодії стрибка ущільнення з надзвуковим ламінарним примежовим шаром за наявності тепломасообміну з поверхнею** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.69 – 83.

Проведені параметричні чисельні експерименти по впливу тепло- та масообміну на відрив потоку при взаємодії косоного стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром. Застосовано неявний скінченно-об'ємний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса. На основі аналізу просторових розподілів тиску, профілів густини, динамічного коефіцієнта в'язкості, поздовжніх компонент швидкості і кількості руху в примежовому шарі виявлено основні фізичні чинники, що визначають зміни структури відривної взаємодії в умовах тепло- та масообміну. Незважаючи на різну фізичну природу впливу, тепло-і масообмін з поверхнею надає подібну результуючу дію на розміри та структуру надзвукової відривної зони. За допомогою тепло- та масообміну є можливим запобігання виникненню відривної зони у двовимірних надзвукових течіях.

Бібл. 17, іл. 10.

УДК 004.056.5

Суковенко К.Г. **Інформаційна технологія для підтримки рішень у сфері відеоспостереження** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.84 – 91.

У статті представлено концепцію створення багаторівневої інформаційної технології, яка забезпечує підтримку прийняття рішень у сфері відеоспостереження. Система поєднує сенсорні пристрої, обчислення на периферії, аналітичні AI-модулі та механізми інтеграції з іншими інформаційними платформами. Розглянуто аспекти автоматизації обробки відеоданих, адаптації до середовища функціонування, а також забезпечення інформаційної безпеки. Стаття актуалізує важливість таких систем у реалізації безпечного урбаністичного середовища.

Бібл. 6, іл. 0, табл. 0.

УДК 621.771.09

Зінченко М.Д., Потап О.Ю., Бурчак А.А., Михайловський М.В., Шибакінський В.І., Іванова Л.Х. **Дослідження процесу різання сортового прокату на рейкобалочних та великосортних станах** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.92 – 100.

Розглядається процес різання на рейкобалочних та великосортних станах при коливаннях довжини розкату, які відбуваються за рахунок впливу температури розкатів і розмірів заготовок. Метою роботи є дослідження умов різання останньої штанги мірної довжини та залишку прокату в умовах нестабільної довжини розкату. Якщо залишок перевищує величину технологічної обрізі, щоб запобігти переводу у відходи придатного прокату, остання штанга мірної довжини і залишок ріжуться на дві штанги немірної нормальної довжини. Отримано вираз для визначення довжини залишку виходячи з відношення цін на мірний прокат, нормальний прокат та відходи, побудований графік прибутку від довжини залишку для різних способів різання.

Бібл.4, іл.2, табл. 2.

УДК 623.618.2

Федоренко О.Д., Клим В.Ю., Клименко С.В. **Непараметрична статистика випадкових величин з невідомими функціями розподілу ймовірностей** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.101 – 111.

Досліджено проблему аналізу статистичних даних з невідомими законами розподілів відмінних від нормального, для яких застосування класичних параметричних методів неефективне. Використано непараметричні методи, зокрема ранжування та аналіз екстремальних значень, на прикладі двох типів розподілів: логістичного (симетричного) та експоненційного (асиметричного). Проведені обчислювальні експерименти та отримані відповідні графіки за допомогою програмного пакету Matlab. Вибірки генерувалися за заданими параметрами, після чого розраховані їх статистичні характеристики: середні значення, мінімуми, максимуми, зсуви та масштаби. Виконана перевірка на статистичну однорідність отриманих значень спеціальних критеріїв із застосуванням

t-тесту. Показана працездатність даного алгоритму розрахунку для попереднього визначення або додаткової перевірки статистичної однорідності вибірок часових рядів в заданих умовах.

Бібл. 9, Іл. 3, Табл. 4.

УДК 681.3.06

Трипутень М., Кузнецов В., Іванова Л.Х. **Адаптація предикатної моделі в задачах керування нестационарними статичними об'єктами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.112 – 127.

У даній роботі розглянуто актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності управління статичними та квазістатичними технологічними об'єктами в умовах їх нестационарної поведінки та мінливості зовнішніх впливів. Особлива увага приділяється застосуванню предикатних моделей, які дозволяють формалізовано описувати різноманітні технологічні ситуації, стани та взаємозв'язки параметрів об'єкта управління за допомогою логічних конструкцій. Такі моделі є гнучким інструментом для представлення знань про об'єкт і забезпечують можливість адаптації до зміни параметрів у процесі експлуатації.

Бібл. 18.

УДК 533.6

Тонкошкур І.С. **Чисельний аналіз аеродинамічних характеристик некругових конусів при надзвуковому обтіканні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.128 – 135.

Розглядається задача про надзвукове обтікання гострого конуса з довільним гладким поперечним перерізом потоком в'язкого газу. Запропоновано методику розрахунку аеродинамічних характеристик цього тіла, що ґрунтується на чисельному інтегруванні рівнянь Ейлера і ламінарного примежового шару. Проаналізовано вплив геометричних і фізичних параметрів на інтегральні характеристики течії. Показано, що форма поперечного перерізу біеліптичного конуса суттєво впливає на величину його аеродинамічних коефіцієнтів.

Бібл. 12, іл. 2.

УДК 004.942:621.65.052

Кобзар В.І., Кривенко О.Ю., Пікільняк А.В. **Оптимізація параметрів гідротранспортних систем з урахуванням критеріїв надійності** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.136 – 146.

У статті розглянуто підходи до підвищення надійності гідротранспортних систем шляхом стохастичного моделювання гідроабразивного зносу. Запропоновано математичні моделі оцінки надійності насосів і трубопроводів, проведено оптимізацію розміщення насосних станцій. Визначено раціональні структурні схеми систем з урахуванням техніко-економічних показників і режимів роботи. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність промислової експлуатації.

Бібл. 6, табл. 1.

УДК 004.623

Краснюк М.А., Гнатушенко Вік. В., Мороз Б.І., Сокол В.Р. **Розробка автоматизованої системи центру авторизації** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.147 – 155.

В результаті проведеної роботи розроблено програмне забезпечення, яке виконує функції формування та контролю авторизації користувачів. Реалізований функціонал для реєстрації нових користувачів, включаючи збереження їхніх особистих даних та інформації для авторизації. Забезпечено механізми для збереження та захисту конфіденційної інформації користувачів, включаючи паролі та інші облікові дані.

Бібл. 11.

УДК 004.8

Островська К.Ю., Носов В.О. **Методи машинного навчання для антифрод-систем** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.156– 163.

У роботі розглянуто сучасні підходи до виявлення шахрайства у фінансовій сфері, електронній комерції та цифрових сервісах. Зроблено огляд трьох основних напрямів: алгоритмів класифікації, методів виявлення аномалій і глибокого навчання. Особливу увагу приділено гібридним архітектурам, що поєднують різні підходи машинного навчання для підвищення точності, а також практичному застосуванню – дисбалансу класів, масштабованості та прозорості моделей. Робота побудована на актуальних дослідженнях та прикладах реального застосування.

Бібл. 12.

УДК 528.88:630

Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергєєва К.Л., Рой Д.М. **Аналіз методик автоматизованого картування змін водойм** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.164– 171.

В статті розглянуті основні методи автоматизованого картування змін водойм із застосуванням даних дистанційного зондування Землі. Використання різномірних даних у поєднанні з комбінацією методів на основі спектральних індексів та машинного навчання демонструють найкращий результат. Розглянуто методи автоматизованого картування із застосування дистанційного моніторингу та применимость методів для аналізу водних ресурсів України. Основні класичні методи базуються на використанні спектральних індексів, машинного навчання та порогоування зображень. Застосування різномірних даних у поєднанні з комбінацією методів демонструють найкращий результат. Слід зазначити що такі методи не дозволяють отримати точне порогове значення для відносно невеликих водойм. Метод картування поверхневих вод із застосуванням радарних зображень та використанням методу вибору оптимального порогу, еталонної маски води, показав найкращий результат.

Бібл. 21.

УДК 655.2:519.8

Клевцов М.К., Рудакова Г.В. **Оптимізація розкрою листового паперу для потреб поліграфічного виробництва** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.172– 177.

У статті представлено концепцію, архітектуру та принципи реалізації інформаційного модуля підтримки прийняття рішень (ІМ ППР) для технолога поліграфічного підприємства. Модуль розроблено з метою автоматизації процесів підготовки до друку, вибору оптимальних параметрів розкрою, призначення матеріалів і вибору технологічного маршруту. Запропоноване рішення поєднує математичні моделі, виробничі дані та евристичні правила з практики, що дозволяє зменшити час прийняття рішень та знизити ймовірність помилок.

Бібл. 7.

УДК 666.972.018.2

Ведмідь В.В., Нестеренко Т.М., Нестеренко М.М., Пирлик М.О. **Експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.178– 188.

У статті наведено результати експериментальних досліджень ущільнення полістиролбетонної суміші із застосуванням комбінованої імпульсно-вібраційної установки. Розглянуто вплив ключових технологічних параметрів – зазору між рамами, маси привантажувача та тривалості ущільнення – на формування структури бетонного виробу. Вивчено ефективність двох режимів ущільнення: лише вертикального імпульсного навантаження та комбінованого (вертикальні імпульси + горизонтальні вібрації). Встановлено, що поєднання імпульсного й вібраційного збудження дозволяє підвищити межу міцності на стиск до 5–7%. Представлено побудовані поверхні відгуку, що ілюструють вплив досліджуваних факторів на кінцеву міцність виробу. Отримані результати доцільно враховувати при оптимізації режимів ущільнення у виробництві стінових легкобетонних панелей.

Бібл. 8, рис. 6, табл. 5.

УДК 629.113

Стрельбіцький В.В. **Дослідження зносу шин портових контейнерних напівпричепів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.189– 197.

Знос шин причепів-контейнеровозів-природне явище, але суттєво впливає на безпеку руху, економічну доцільність і загальну ефективність транспортування вантажів. Знання причин, симптомів і способів боротьби зі зносом вкрай важливо для власників автопарку і водіїв. Успішне управління зносом шин причепів-контейнеровозів досягається за рахунок взаємопов'язаного застосування наступних заходів: вибору надійних шин, регулярного технічного обслуговування, підтримки оптимального тиску, належного завантаження і навчання водіїв.

Бібл. 9. Іл. 4. Табл.

УДК 519.876.5+004.4'272+005.8

Селівьорстова Т.В., Мала Ю.В., Гуда А.І., Зеленцов Д.Г., Кокович Б.О., Веровкін О. **Оцінка та оптимізація ймовірності завершення ІТ-проєкту за методом PERT** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.198– 210.

У статті досліджено застосування методу PERT (Program Evaluation and Review Technique) для аналізу й оптимізації строків реалізації ІТ-проєктів в умовах невизначеності. Метод PERT дозволяє моделювати часові параметри задач проєкту на основі трьох експертних оцінок (оптимістичної, ймовірної та песимістичної), обчислювати очікувану тривалість проєкту та оцінювати ймовірність його завершення у встановлений термін. Запропоновано формалізовану постановку оптимізаційної задачі, що передбачає мінімізацію ризику затримки шляхом впливу на параметри задач критичного шляху: зменшення тривалості та дисперсії. Проведено обчислювальний експеримент на прикладі умовного ІТ-проєкту з 9 задачами, де визначено критичний шлях і оцінено ймовірність своєчасного завершення при заданому дедлайні. Здійснено оптимізацію, в результаті якої ймовірність завершення проєкту у строк зросла з 15.78% до 43.34%. Отримані результати демонструють доцільність поєднання PERT з методами математичного моделювання при плануванні складних проєктів. Показано, що навіть незначні зміни у параметрах задач можуть суттєво знизити ризики і підвищити надійність дотримання строків реалізації ІТ-проєктів.

Рис. 3, табл. 2, Літ. 8.

УДК 004.4

Шилін А.А., Журба А.О. **Реалізація та дослідження методів автоматизації кадрового планування** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(160). – Дніпро, 2025. – С.211– 222.

В статті досліджено ефективність різних методів планування людських ресурсів в ІТ-компаніях. Було розроблено програмний продукт, який зможе ефективно управляти проєктами та планувати людські ресурси в ІТ-компанії. Впровадження розробленої системи управління проєктами та методів планування людських ресурсів призводить до підвищення ефективності роботи команди та покращення результатів проєктів. Рекомендовано застосовувати розроблені методи та інструменти для підвищення конкурентоспроможності ІТ-компаній.

Бібл. 8, іл. 11, табл. 1.

UDC 004.021

Molodets B., Bulana T., Boldyriev D. **Analysis of existing architectures for the development of an information system of air quality assessment** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.3 – 10.

The paper focuses on the development of information technology for weather modeling and forecasting using modern deep learning methods. The relevance of the topic is driven by growing climate risks, an increase in the frequency of extreme weather events, and the need for highly accurate meteorological analytics for the agricultural sector, transportation, energy, and civil defense systems. FourCastNet, a modern architecture based on deep neural networks and transformers that combines high performance with the ability to process large-scale historical meteorological data, was chosen as the main model for generating forecasts.

Bibl. 10.

UDC 004.043

Zarodiuk A.V., Likhouzova T.A. **Analysis of scientific and practical achievements in the sphere of reverberation effects generation** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.11 – 23.

The study addresses the problem of creating realistic reverberation sound effects in computer games. The primary features of existing reverberation generation methods are outlined, including the complexity of manual sound parameter adjustments, the static nature of models, and limited adaptability to the geometry of the game environment. It was determined that the problem of creating realistic reverberation effects for computer games is achievable only when using modern approaches that reduce manual tuning and increase the adaptability of sound parameters. Based on the analysis, it was determined that there are significant obstacles that reduce the realism of acoustic accompaniment using available methods.

Bibl. 20.

UDC 623.618.2

Klymenko O.D. **Verification of homogeneity of pseudorandom samples by Anderson and Bush-Wind criteria** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.24 – 33.

The article considers the issue of statistical homogeneity of pseudorandom variables. The aim of the study is to assess the effectiveness of two criteria: Anderson's two-sample criterion and the combined Bush-Wind criterion. The possibilities of the criteria for detecting statistically significant differences between samples are investigated, especially in cases where one of the samples contains "contaminated" data (Tukey samples). Anderson's criterion is based on the analysis of the rank characteristics of samples, which allows assessing their homogeneity under conditions of unknown distribution. In contrast, the combined Bush-Wind criterion is universal and can analyze samples with different distributions, considering both average values and variances. The practical value of the study lies in determining the optimal conditions for using each of the criteria for samples of different sizes and with unknown statistical parameters. The use of these criteria can be effectively applied when studying small samples ( $n \leq 60$ ). It was determined that it is advisable to combine statistical criteria with data cleaning methods or use robust analogues. The results obtained can be applied in experi-

mental physics, sociology, engineering, biomedical research, and other fields, where it is important to assess the homogeneity of experimental data.

Bibl. 7, Fig. 4, Tabl. 3.

UDC 004.94, 624.9, 692

Movchan Oleksandr **Advanced damage plasticity modelling and calibration strategies for accurate finite element analysis of unreinforced concrete in thin-walled structures** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.34 – 42.

A unified workflow is presented for high-accuracy finite-element simulation of unreinforced concrete in thin-walled structures. The approach combines damage-plasticity constitutive laws with a step-by-step calibration sequence that uses compression, tension, and fracture tests, plus refined through-thickness meshing and nonlocal regularization to eliminate mesh bias. A properly tuned Concrete Damaged Plasticity model reproduces load–deflection curves and crack patterns within fifteen percent of experiments. The study also highlights the need for open benchmark databases and machine-learning tools to streamline parameter identification and enhance model reliability.

Bibl. 11, ill. 0, tabl. 0.

UDC 004.8, 004.93, 624.042.7, 692.5

Hryhorovych M **Detecting flat roof defects with machine learning and deep learning techniques** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.43 – 49.

This article presents a structured overview of modern deep learning techniques—convolutional neural networks (CNNs), semantic segmentation (U-Net, DeepLab, TransUNet), object detection (YOLO, Faster R-CNN), and autoencoder-based anomaly detection—for identifying structural damage, with a focus on flat roofs. UAV-captured RGB and infrared images are used as primary data sources, enabling remote inspection of inaccessible areas. The study highlights how deep learning methods achieve over 85% accuracy in recognizing cracks, spalling, or moisture damage. A comparison table summarizes model performance across structural components. Real-world case studies demonstrate the practicality of integrating AI-driven tools into structural monitoring workflows. The article outlines challenges such as dataset limitations and generalization issues, and recommends the fusion of multimodal data and digital twin systems for future work.

Bibl. 10, ill. 1, tabl. 1.

UDC 004.8 + 311.2

Bakhrushyn O., Bakhrushyn V. **Application of artificial intelligence tools for data search and preliminary analysis in applied research of educational systems** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.50 – 57.

The problems of using popular artificial intelligence tools GROK 3 and ChatCPT 4 for collecting data on educational systems available on the Internet, their pre-processing and analysis are considered. It has been shown that both tools significantly speed up and simplify the execution of routine research stages. At the same time, GROK 3 provides more complete, reliable and high-quality data, which are generally close to similar data from other sources.

Therefore, its use to solve problems of the class under consideration can be useful in conducting research on educational systems and developing educational policies.

Ref. 7, fig. 7.

UDC 627.63. 632.81.618.83

Povorotnya I.R., Safronova O.A., Podolskyi R.V., Kononenko G.A. **Optimal Mn/Si parameters for adjusting the mechanical properties of steel for railway axles** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.58 – 68.

The study presents an approach to optimizing steel composition based on the concept of directed chemical bonding. The method accounts for interactions between elements at the interatomic level, which is critical for predicting material properties. The main focus is on the influence of carbon, silicon, and manganese content on the system's charge state, represented by the ZY parameter. It was found that to increase hardness, the Mn/Si ratio should be adjusted: below 2.8–3.2, priority is given to silicon; above this range, to manganese. Controlling alloying elements enables the development of steels with predictable properties.

Bibl. 7, ill. 8.

UDC 532.516

Polevoy O.B., Redchyts D.O. **Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a supersonic laminar boundary layer in the presence of heat and mass exchange with the surface** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.69 – 83.

Parametric numerical experiments on the influence of heat and mass transfer on flow separation during the interaction of an oblique shock wave with a laminar boundary layer were carried out. An implicit finite-volume algorithm for solving the Navier-Stokes equations is applied. It is shown that despite the different physical nature of the influence, heat and mass transfer with the surface has a similar resulting effect on the size of the supersonic separation zone. It was found that by means of heat and mass transfer it is possible to prevent the occurrence of a separation zone in two-dimensional supersonic flows.

Ref. 16, fig. 10.

UDC 004.056.5

Sukovenko K. **Information technology for decision support in the field of video surveillance** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.84 – 91.

The article presents the concept of developing a multi-level information technology system that provides decision support in the field of video surveillance. The system integrates sensor devices, edge computing, analytical AI modules, and mechanisms for integration with other information platforms. It discusses aspects of automated video data processing, adaptation to operational environments, and information security. The article emphasizes the importance of such systems in creating a secure urban environment.

Ref.6, Fig. 0, Tabl. 0.

UDC 621.771.09

Zinchenko M.D., Potap O.Yu., Burchak A.A., Mykhailovskyi M.V., Shybakinskyi V.I., Yvanova L **Research of the process of cutting long rolled steel on rail-beam and large-section mills** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.92 – 100.

The cutting process on rail and beam mills with fluctuations in the length of the roll, which occur due to the influence of the temperature of the rolls and the sizes of the blanks, is considered. The aim of the work is to study the conditions for cutting the last bar of the measured length and the remaining rolled product under conditions of unstable rolling length. If the remaining product exceeds the technological cut-off value, in order to prevent the conversion of suitable rolled products into waste, the last bar of the measured length and the remaining product are cut into two bars of non-measured normal length. An expression for determining the length of the remaining product is obtained based on the ratio of prices for measured rolled products, normal rolled products and waste, and a graph of profit from the length of the remaining product for different cutting methods is constructed.

Bibl. 4, ill. 2, tabl. 2.

UDC 623.618.2

Fedorenko O.D., Klym V.Y., Klymenko S.V. **Nonparametric statistics of random variables with unknown probability distribution function** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.101 – 111.

The problem of analyzing statistical data with unknown laws of distributions other than normal, for which the use of classical parametric methods is ineffective, is investigated. Nonparametric methods, in particular, ranking and analysis of extreme values, are used on the example of two types of distributions: logistic (symmetric) and exponential (asymmetric). Computational experiments were conducted and the corresponding graphs were obtained using the Matlab software package. Samples were generated according to the specified parameters, after which their statistical characteristics were calculated: mean values, minima, maxima, shifts and scales. The statistical homogeneity of the obtained values of special criteria was checked using the t-test. The efficiency of this calculation algorithm for preliminary determination or additional verification of the statistical homogeneity of time series samples under given conditions is shown.

Bib. 9, Fig. 3, Table 4.

UDC 681.3.06

Tryputen M., Kuznetsov V., Yvanova L. **Adaptation of a predicate model in control problems of nonstationary static objects** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.112 – 127.

When controlling static objects at the optimization level, pattern recognition methods are used that allow partitioning the factor space into elementary subdomains in the form of n-dimensional hyperparallelepipeds. One of the main elements of the control structure for this approach to control is the adaptation algorithm, that makes it possible to refine the description of a static object under nonstationarity conditions. Repeated use of the adaptation algorithm to refine the model leads to an unjustified complication of its logical structure and the accumulation of information that has lost its relevance. The paper proposes a method for minimizing the description of images of technological situations, that makes it possible to overcome the indicated disadvantages.

Bibl. 18.

UDC 533.6

Tonkoshkur I.S. **Numerical analysis of aerodynamic characteristics of non-circular cones during supersonic flow** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.128 – 135.

The problem of supersonic flow of a viscous gas flow around a sharp cone with an arbitrary smooth cross-section is considered. A method for calculating the aerodynamic characteristics of this body is proposed, which is based on the numerical integration of the Euler equations and the laminar boundary layer. The influence of geometric and physical parameters on the integral characteristics of the flow is analyzed. It is shown that the shape of the cross-section of a bielliptic cone significantly affects the value of its aerodynamic coefficients.

Bib. 12, ill. 2.

UDC 004.942:621.65.052

Kobzar V.I., Kryvenko O.Yu., Pikilniak A.V. **Optimization of hydrotransport system parameters taking into account reliability criteria** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.136 – 146.

The article presents approaches to improving the reliability of hydrotransport systems through stochastic modeling of hydroabrasive wear. Mathematical models for evaluating the reliability of pumps and pipelines are proposed, along with the optimization of pump station placement. Rational structural schemes are identified considering both technical and economic indicators as well as operating modes. The results obtained enhance the efficiency of industrial operation.

Bibl. 6, Tabl. 1.

UDC 004.623

Krasnyuk M., Hnatushenko Vik., Moroz B., Sokol O. **Development of an automated authorization center system** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.147 – 155.

The result of the work, software was developed that performs the functions of forming and controlling user authorization. Functionality for registering new users was implemented, including saving their personal data and information for authorization. Mechanisms were provided for saving and protecting confidential user information, including passwords and other credentials.

Refs. 11.

UDC 004.8

Ostrovska K.Y., Nosov V.O. **Machine learning methods for antifraud systems** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.156 – 163.

The paper provides an overview of modern approaches to fraud detection in finance, e-commerce, and digital services. It focuses on three key areas: classification algorithms, anomaly detection methods, and deep learning techniques. Special attention is given to hybrid architectures that integrate various machine learning approaches to improve detection accuracy. The review addresses key practical challenges such as class imbalance, scalability, and model transparency and is grounded in recent research findings and real-world implementations.

Bibl. 12.

UDK 528.88:630\*162.5

Kavats O.O., Kavats Y.V., Sergieieva K.L., Roi D.M. **Analysis of automated mapping techniques for changes in water bodies** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.164 – 171.

The article discusses the main methods of automated mapping of changes in water bodies using remote sensing data. The use of heterogeneous data in combination with a combination of methods based on spectral indices and machine learning demonstrates the best results. The article discusses automated mapping methods using remote monitoring and the applicability of these methods for analysing water resources in Ukraine. The main classical methods are based on the use of spectral indices, machine learning and image thresholding. The use of heterogeneous data in combination with a combination of methods demonstrates the best results. It should be noted that such methods do not allow obtaining an accurate threshold value for relatively small water bodies. The method of mapping surface waters using radar images and the method of selecting the optimal threshold, the reference water mask, showed the best results.

Bib. 21.

UDC 655.2:519.8

Klevtsov M.K., Rudakova G.V. **Optimization of sheet paper cutting for the needs of printing production** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.172 – 177.

The article presents the concept, architecture and principles of implementation of the information module for decision support (IM PPR) for the technologist of a printing enterprise. The module was developed to automate the processes of preparation for printing, selection of optimal cutting parameters, assignment of materials and selection of a technological route. The proposed solution combines mathematical models, production data and heuristic rules from practice, which allows to reduce decision-making time and reduce the probability of errors.

Bibl. 7.

UDC 666.972.018.2

Vedmid V.V., Nesterenko T.M., Nesterenko M.M., Pyrlyk M.O. **Experimental studies of a combined impulse-vibration installation** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.178 – 188.

The article presents the results of experimental studies on the compaction of polystyrene concrete mixture using a combined impulse-vibration installation. The influence of key technological parameters - the gap between the frames, the mass of the loading device, and the compaction duration - on the formation of the concrete structure was analyzed. Two compaction modes were investigated: only vertical impulse loading and a combined mode (vertical impulses + horizontal vibrations). It was established that the combination of impulse and vibrational excitation makes it possible to increase the compressive strength limit by 5–7%. Response surfaces were constructed to illustrate the effect of the studied factors on the final strength of the product. The obtained results are recommended for use in optimizing compaction regimes during the production of lightweight concrete wall panels.

Ref.8, Fig.6, Tabl.5.

UDK 629.113

Strelbitskiy V.V. **Research of tire wear on port container semi-trailers** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.189 – 197.

Tire wear on container trailers is a natural phenomenon, but it has a serious impact on traffic safety, economic feasibility, and overall cargo transportation efficiency. Knowing the causes, symptoms, and ways to combat wear and tear is crucial for fleet owners and drivers. Successful management of container truck trailer tire wear is achieved through the interconnected application of several measures: the selection of reliable tires, regular maintenance, maintaining optimal pressure, proper loading, and driver training.

Ref.9. Fig.4.Tabl.0.

UDK 519.876.5+004.4'272+005.8

Seliviorstova T.V., Mala Yu.V., Huda A.I., Zelenetsov D., Kokovych B.O., Verovkin O. **Estimation and optimization of IT project completion probability using the PERT method** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.198 – 210.

The article explores the application of the PERT (Program Evaluation and Review Technique) method for analyzing and optimizing the timelines of IT project implementation under conditions of uncertainty. The PERT method enables the modeling of project task durations based on three expert estimates (optimistic, most likely, and pessimistic), allowing for the calculation of the expected project duration and the estimation of the probability of completing the project within a specified deadline. A formal optimization problem is proposed, aimed at minimizing the risk of delay by influencing the parameters of the tasks on the critical path - specifically, by reducing both their duration and variance.

A computational experiment was conducted using a sample IT project consisting of nine tasks. The critical path was identified, and the probability of on-time project completion under a given deadline was assessed. An optimization was carried out, resulting in an increase in the probability of completing the project on time from 15.78% to 43.34%.

The obtained results demonstrate the relevance of combining the PERT method with mathematical modeling techniques in the planning of complex projects. It is shown that even minor changes in task parameters can significantly reduce risks and increase the reliability of meeting project deadlines.

Fig. 3, Table 2, Ref. 8.

UDC 004.4

Shilin A., Zhurba A. **Implementation and research of methods for automating human resource planning** // System technologies. N 5(160) - Dnipro, 2025.- P.211 – 222.

The article investigates the effectiveness of various methods of human resource planning in IT companies. A software product has been developed that can effectively manage projects and plan human resources in an IT company. The implementation of the developed project management system and human resource planning methods leads to increased team efficiency and improved project results. It is recommended to apply the developed methods and tools to increase the competitiveness of IT companies.

Bibl. 8, pic. 11, tabl. 1.

**Системні технології**  
**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
Випуск 5 (160)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Острівська

---

Здано до набору 27.06.2025. Підписано до друку 01.07.2025.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 17,2. Обл.–видавн. арк. – 15,06.

Тираж 300 прим. Замовл. – 05/25

---

Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,  
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»  
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

**Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік**

## Редакційна колегія

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна**  
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

**Алпатов Анатолій Петрович**

Член-кореспондент НАН України,  
професор, доктор технічних наук

**Архипов Олександр Євгенійович**

професор, доктор технічних наук

**Бабічев Сергій Анатолійович**

доцент, доктор технічних наук

**Білозьоров Василь Євгенович**

професор,

доктор фізико-математичних наук

**Гече Федір Елемирович**

професор, доктор технічних наук

**Гуда Антон Ігорович**

(*заст. головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

**Гнатушенко Вікторія Володимирівна**

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

**Гнатушенко Володимир Володимирович**

професор, доктор технічних наук

**Гожий Олександр Петрович**

професор, доктор технічних наук

**Єрьомін Олександр Олегович**

професор, доктор технічних наук

**Кіріченко Людмила Олегівна**

професор, доктор технічних наук

**Світличний Дмитро Святозарович**

професор, доктор технічних наук

**Скалозуб Владислав Васильович**

професор, доктор технічних наук

**Хандецький Володимир Сергійович**

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського", Україна

Jan Evangelista Purkyně University

in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне, Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені

П.Могилы, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет

радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С.

Сташіца, Польща

Український державний університет науки і

технологій, ННІ «Дніпровський інститут

інфраструктури і транспорту»Україна

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна