



ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 4(112)

•• 2025 ••

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 4 (112) 2025

Виходить 4 рази на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2025

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Банніков Д. О., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., УДУНТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакулєнко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головова Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний технічний університет (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнєцов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкін Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мурадян Л. А., УДУНТ (Україна); Очкасов О. Б., УДУНТ (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Пітман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютькін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р. Ідентифікатор медіа: R30-01395.
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 26.12.2025 р., протокол № 4

Видавець Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 рр. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 4 (112) 2025

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2025

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief
Deputy Chief Editor
Executive Editor

Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Bannikov D. O., Doctor of Technical Sciences
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Muradian L. A., USUST (Ukraine); Ochkasov O. B., USUST (Ukraine); Sokhatsky A. V., University of customs and finances (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine)

Journal
was registered

Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023. Media identifier: R30-01395

Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).

Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.

Published according to the Academic Council decision of the University from 26.12.2025, Protocol no. 4

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address
of Founder

Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua; journal site: <http://stp.ust.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;

1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);

2013–2022 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;

since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.2:004.358

К. В. ГОНЧАРОВ^{1*}, Р. В. РИБАЛКА^{2*}, В. В. МАЛОВІЧКО^{3*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта k.v.honcharov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0432-1077

^{2*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517

^{3*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0008-2704-5555

Підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації

Мета. Удосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації шляхом підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних через рейкову лінію. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено аналіз існуючих рішень щодо вдосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації. Проведено порівняльну оцінку ємності каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації з числовим кодуванням АЛСН та потенційної ємності каналу через рейкову лінію. Запропонована система команд багатозначної автоматичної локомотивної сигналізації, яка крім традиційних команд АЛСН дає змогу передавати на локомотив інформацію про обмеження швидкості на станціях, постійні обмеження відповідно до особливостей залізничних ділянок, а також інформацію про поточну поїзну ситуацію на перегоні з урахуванням можливого збільшення швидкостей до 250 км/год. Для підвищення завадостійкості каналу передачі даних запропоновано використовувати код Файра та квадратурну фазову маніпуляцію QPSK. Визначено твірний поліном коду Файра, розрахована інформаційна швидкість та час передачі однієї команди. **Результати.** Для дослідження завадостійкості запропонованої системи розроблено імітаційну модель, програмний код якої написаний мовою Python. Встановлено, що код Файра (12,6) гарантовано виявляє всі помилки, крім чотирикратних, шестикратних та восьмикратних. Для усунення таких помилок запропоновано виконувати багатократний прийом кожної команди. Відповідно до результатів моделювання загальний коефіцієнт невиявлення для однократного прийому дорівнює 0,0087, для двократного прийому – $1,6 \cdot 10^{-5}$. У разі трикратного прийому невиявлення помилок під час моделювання не фіксувалось. **Наукова новизна.** Авторами цієї роботи запропоновано комплекс рішень для удосконалення неперервної системи автоматичної локомотивної сигналізації: збільшення ентропії джерела; зменшення інформаційних втрат завдяки застосуванню завадостійкого коду Файра та чотиріпозиційної фазової маніпуляції; підвищення частоти передачі повідомлень та багатократний прийом. **Практична значимість.** Впровадження запропонованих рішень дозволить підвищити ємність та завадостійкість каналу передачі даних через рейкову лінію, розширити систему команд автоматичної локомотивної сигналізації з урахуванням обмежень швидкості на станціях, інформації про встановлену швидкість для швидкісних залізничних ліній, а також постійних обмежень відповідно до особливостей залізничних ділянок.

Ключові слова: автоматична локомотивна сигналізація; рейкова лінія; ємність каналу передачі; ентропія джерела; завадостійке кодування; код Файра; чотиріпозиційна фазова маніпуляція; імітаційне моделювання

Вступ

Система автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) забезпечує передачу на локомотив інформації про сигнали колійних світлофорів, здійснює контроль швидкості руху поїзда, перевірку пильності машиніста та керування електропневматичним клапаном автостою. Від надійної та ефективної роботи АЛС багато в чому залежить безпека руху поїздів [10, 20].

Наразі в Україні застосовується система автоматичної локомотивної сигналізації безперервної дії з числовим кодуванням АЛСН. У такій системі для утворення каналу зв'язку між колійними та локомотивними пристроями застосовується рейкова лінія (РЛ), через яку можуть передаватись три кодових сигнали (три команди): *З*, *Ж* та *ЧЖ*. Це дає змогу машиністу отримати інформацію про вільність двох блок-ділянок попереду поїзда та вжити заходів для підтримання безпечної швидкості руху з можливістю зупинитися перед перешкодою за напрямком руху [20].

В умовах підвищення швидкостей руху поїздів збільшується їх гальмівний шлях. Це викликає необхідність передавати на локомотив інформацію про вільність більшої кількості блок-ділянок попереду. В системі команд АЛСН також не враховуються постійні та тимчасові швидкісні обмеження на шляху прямування, обмеження швидкості в залежності від маршруту руху станцією. Крім низької інформативності до недоліків системи АЛСН відносяться: висока інерційність, низька завадостійкість, реалізація на застарілій елементній базі, а також нестабільна робота в межах станції на коротких рейкових колах.

Застосування цифрового радіоканалу замість каналу зв'язку на базі РЛ дає змогу суттєво підвищити інформативність системи АЛС. Зокрема, в Європейській системі керування залізничними перевезеннями ERTMS для передачі команд керування на локомотив використовується канал радіозв'язку GSM-R [16, 15, 19, 20]. В роботі [14] для забезпечення безпечної передачі даних на локомотив пропонується використовувати транкінговий радіозв'язок TETRA у поєднанні з технологією мобільного зв'язку 5G. На даний час замість застарілого стандарту GSM-R на базі технології 5G NR розробляється майбутня система мобільного

зв'язку для залізничного транспорту FRMCS, впровадження якої забезпечить телекомунікаційні потреби всіх залізничних служб та сприятиме розвитку «розумної залізниці» [21]. В Україні система GSM-R не використовується, а впровадження мережі мобільного зв'язку FRMCS чи інших сучасних телекомунікаційних систем потребує дуже великих фінансових ресурсів. На жаль, у зв'язку із воєнним станом та складною економічною ситуацією такі системи найближчим часом навряд чи з'являться в Україні. Тому головним каналом передачі даних на локомотив залишається канал через рейкову лінію.

У роботі [1] проаналізовано статистику відмов системи АЛСН. Визначено, що основною причиною відмов є зношеність апаратури, перш за все це стосується локомотивного дешифратора. Встановлено також, що причинами збоїв у системі АЛСН зокрема є спотворення часових параметрів коду, намагніченість рейок та нестабільне живлення.

Одним із напрямів вдосконалення системи АЛСН є оновлення локомотивної апаратури та впровадження більш ефективних методів обробки сигналів. В роботі [12] для підвищення завадостійкості системи АЛСН запропонований удосконалений метод дешифрування сигналів, який базується на застосуванні спектрального аналізу та Wavelet перетворення. Автори роботи [6] пропонують використовувати нейромережеву модель для розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН. У [9] для своєчасного виявлення спотворень сигналу в системі АЛСН запропоновано використовувати адаптивну систему нейронечіткого логічного висновку (ANFIS) та ентропію Шеннона енергії вейвлет-пакетів (WPESE). Для захисту локомотивної сигналізації від завад в роботі [17] пропонується метод обробки сигналів із застосуванням алгоритму оптимізації PSO та глибокої нейронної мережі DBN. Проте все це не вирішує проблему низької інформативності та швидкодії системи АЛСН.

Інший напрям вдосконалення системи АЛС пов'язаний із застосуванням більш досконалих методів передачі даних через РЛ, що крім підвищення завадостійкості дасть змогу передавати більшу кількість команд та збільшити швидкість передачі. В роботі [13] для передачі ко-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

манд АЛС запропоновано використовувати множинний доступ з кодовим розділенням (CDMA) та диференціальну бінарну фазову маніпуляцію (DBPSK), а в [11] – ортогональне мультиплексування з частотним розділенням (OFDM) та квадратурну фазову маніпуляцію (QPSK). Технології CDMA та OFDM передбачають застосування широкосмужових каналів зв'язку, проте рейкова лінія має відносно вузьку смугу пропускання, яка суттєво залежить від довжини РЛ. Тому впровадження таких технологій на ділянках з довгими РЛ може бути проблемним.

Враховуючи вказане, актуальною залишається задача вдосконалення системи АЛС та пошуку більш ефективних методів передачі даних через рейкову лінію.

Мета

Метою роботи є вдосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації шляхом підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних через рейкову лінію.

Методика

Оцінка ємності каналу в системі АЛСН. Система зв'язку складається з джерела повідомлень, каналу передачі та отримувача повідомлень (рис. 1) [4, 18]. В цифрових системах на передавальній стороні також застосовується кодер, який може виконувати одну або кілька функцій: зменшення інформаційної надмірності повідомлення, шифрування даних, завадостійкості кодування. На приймальній стороні декодер виконує зворотні функції. Канал містить перетворювач повідомлення на сигнал, середовище передачі та перетворювач сигналу на повідомлення. Через вплив завад та спотворення форми сигналу в каналі відбуваються інформаційні втрати.

В системі АЛСН джерело формує одне з трьох повідомлень a_1, a_2, a_3 (коди *З*, *Ж* та *ЧЖ*) відповідно до стану колійного світлофора та кількості вільних блок-ділянок. Повідомлення перетворюється на числовий кодовий сигнал, який передається через РЛ (середовище передачі) та завдяки індуктивному зв'язку наводиться у локомотивних котушках АЛСН. Локомотивний приймач виконує фільтрацію та підсилення отриманого сигналу. Дешифратор числових ко-

дових сигналів розшифровує отримане повідомлення та вмикає відповідний сигнал на локомотивному світлофорі. Завдяки цьому повідомлення передається машиністу.

Припустимо, що джерело повідомлень (рис. 1) генерує повідомлення a_i (одна з трьох команд АЛСН), тобто має алфавіт $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ об'ємом $N = 3$; отримувач повідомлень (локомотивні пристрої АЛСН) має алфавіт B . Тоді швидкість передачі інформації в дискретному каналі із завадами (середня кількість пересланої інформації за [2]) визначається наступним виразом [4]:

$$R = f_{\text{сер}} [H(A) - H(A|B)] \quad [\text{біт/с}], \quad (1)$$

де $H(A)$ – ентропія джерела повідомлень АЛСН за Шенноном [2, 4]; $H(A|B)$ – умовна ентропія [2, 4], що характеризує втрати інформації у каналі зв'язку (через дію завад та спотворення форми сигналу); $f_{\text{сер}} = 1/T_{\text{сер}}$ – середня частота повідомлень; $T_{\text{сер}}$ – середня тривалість одного повідомлення (визначається типом трансмітера – КПТШ–5 або КПТШ–7).

За фіксованого $f_{\text{сер}}$, максимально можлива інформаційна швидкість (1) в каналі АЛСН досягається за максимального значення $H(A)$ та мінімального значення $H(A|B) = 0$ (тобто втрати інформації в каналі відсутні). Визначимо максимально можливу ентропію джерела для випадку, коли всі повідомлення незалежні та рівновірогідні [2]:

$$H_{\text{max}}(A) = \log_2 N = \log_2 3 \approx 1,585 \text{ (біт)}. \quad (2)$$

Тоді з (1) оцінка максимально можливої інформаційної швидкості в каналі АЛСН має такий вигляд:

$$R_{\text{max}} = \frac{H_{\text{max}}(A)}{T_{\text{сер}}} \quad [\text{біт/с}]. \quad (3)$$

Тривалість кодового циклу АЛСН при використанні трансмітера КПТШ–5 складає $T_{\text{сер}} = 1,6$ с, а КПТШ–7 – $T_{\text{сер}} = 1,86$ с. Тому відповідно виразу (3) за умови використання КПТШ–5:

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

$$R_{\max} \approx 1,585/1,6 \approx 0,99 \text{ (біт/с)},$$

а за умови використання КПТШ–7:

$$R_{\max} \approx 1,585/1,86 \approx 0,85 \text{ (біт/с)}.$$

В системі АЛСН перемикавання локомотивного світлофору відбувається тільки після прийому трьох кодових циклів, тобто застосовується велика інформаційна надмірність. З урахуванням цього, інформаційна швидкість в каналі АЛСН зменшується ще втричі і становить 0,28 біт/с та 0,33 біт/с, відповідно.

Оцінимо ємність каналу передачі даних через рейкову лінію. Розглянемо РЛ як безперер-

вний канал передачі з обмеженими потужностями сигналу та шуму. Відповідно до теореми Шеннона-Гартлі [4] ємність такого каналу при адитивному білому гаусовому шумі залежить від ширини смуги пропускання F_k та відношення сигнал/шум SNR :

$$C = F_k \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) \text{ [біт/с]}, \quad (4)$$

де P_c – середня потужність сигналу АЛСН;

$P_{\text{ш}}$ – середня потужність шуму (завади).

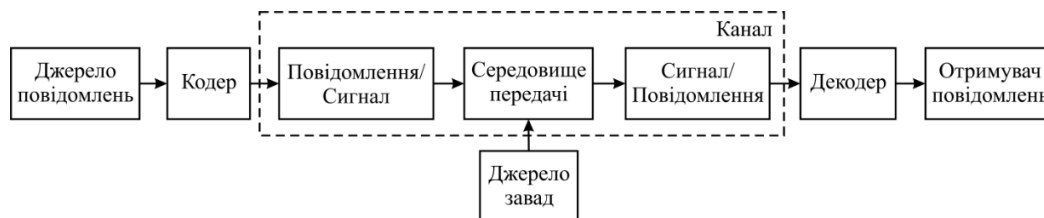


Рис. 1. Структурна схема системи зв'язку

Fig. 1. Communication system block diagram

Ширина F_k частотної смуги пропускання РЛ залежить від її довжини, стану баласту, типу рейок, стикових з'єднувачів та інших факторів. Система АЛС повинна забезпечувати надійну передачу повідомлень на локомотив для будь-якої довжини РЛ, яка для деяких типів рейкових кіл (РК) може досягати значення 2,6 км. В доступних джерелах, на жаль, не вдалось виявити інформацію про натурні експерименти з визначення частотної характеристики РЛ довжиною 2,6 км. Під час моделювання передачі сигналу через РЛ на відстань 1 км в [11] використано OFDM зі смугою частот 5,12...7,39 кГц, при цьому починаючи з 10 кГц загасання в РЛ оцінено як високе. З практики експлуатації тональних рейкових кіл (ТРК) в Україні, для несучої частоти сигнального струму 5 кГц гранично допустима довжина РЛ складає 0,2 км; для 420 Гц – 1 км. Враховуючи оцінки ефективної смуги частот РЛ у [8] і [11] та досвід експлуатації ТРК, в якості досить помірної оцінки в даній роботі припускається $F_k = 300$ Гц.

Припустимо, що $SNR = 1$, тобто потужність завади дорівнює потужності сигналу АЛСН. Тоді за (4):

$$C = 300 \log_2 (1 + 1) = 300 \text{ (біт/с)}. \quad (5)$$

Білий гаусів шум має найбільшу ентропію серед безперервних завад обмеженої потужності. Проте завади в каналі передачі АЛСН суттєво відрізняються від білого шуму. Там діють потужні зосереджені за спектром завади (гармоніки тягового струму, завади від контактної мережі, сигнали контролю вільності рейкового кола тощо) та імпульсні завади, які виникають внаслідок перемикавання обмоток тягових двигунів електровозів, короткочасного порушення контакту між пантографом та контактною мережею та інших комутаційних процесів. Ємність каналу з такими завадами також можна розрахувати відповідно до виразу (4). При цьому в якості потужності шуму необхідно використовувати ентропійну потужність, тобто потужність еквівалентного білого шуму, який має таку саму ентропію, як дана завада [4].

Визначення ентропійної потужності завад, що діють в РЛ, потребує окремих досліджень. Для таких завад відношення сигнал/шум може сильно відрізнятися від одиниці. Тому отримане у виразі (5) значення ємності каналу передачі на базі РЛ (300 біт/с) є дуже приблизним.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Проте, навіть при дуже низькому відношенні сигнал/шум, значення ємності буде суттєво більшим, ніж інформаційна швидкість в системі АЛСН (0,33 біт/с або 0,28 біт/с залежно від типу трансмітера). Таким чином, є суттєвий ресурс для збільшення ємності каналу передачі в системі АЛС. Дуже низька інформаційна швидкість каналу АЛСН пов'язана з низькою значністю системи (використовуються тільки три кодових сигнали) та великою тривалістю кодового циклу.

Ємність дискретного каналу із завадами визначається наступним чином [4]:

$$C = f_{\text{сеп}} \cdot \max [H(A) - H(A|B)] \quad [\text{біт/с}], \quad (6)$$

де максимум враховує всі можливі джерела повідомлень на вході каналу.

Відповідно до (6) можна виділити наступні напрямки підвищення ємності каналу АЛС:

1) збільшення ентропії джерела $H(A)$ за рахунок розширення алфавіту (використання більшої кількості команд);

2) зменшення інформаційних втрат $H(A|B)$ завдяки використанню завадостійких методів кодування повідомлень і модуляції сигналів, підвищення відношення сигнал/шум;

3) підвищення частоти передачі повідомлень $f_{\text{сеп}}$.

Система команд АЛС. В роботі [13] нами запропонована система команд для багатозначної автоматичної локомотивної сигналізації, яка враховує можливе підвищення швидкості руху поїздів до 250 км/год. Дана система містить:

1) три команди для регулювання руху поїздів в межах перегону при використанні тризначного автоблокування (аналог кодів *З*, *Ж* та *ЧЖ*);

2) одну додаткову команду для регулювання руху при чотиризначному автоблокуванні;

3) чотири команди для передачі інформації про встановлену швидкість руху на станції при установці маршруту прийому на бокову колію з відхиленням по стрілочних переводах, які мають хрестовини різних марок;

4) п'ять команд для передачі інформації про встановлену швидкість 160, 180, 200, 220 та 250 км/год (дані команди передбачені для високошвидкісних поїздів);

5) три резервних команди, які можуть застосовуватись для передачі додаткової інфор-

мації з урахуванням конкретних умов експлуатації лінії.

Таким чином, об'єм алфавіту запропонованої системи АЛС дорівнює 16. Для передачі команд будемо використовувати двійкові кодові комбінації (КК). Визначимо мінімально необхідну кількість інформаційних елементів в кожній комбінації

$$k \geq \log_2 N = \log_2 16 = 4. \quad (7)$$

Завадостійке кодування. Для компенсації інформаційних втрат у каналі передачі застосовуються різні види завадостійких кодів [4, 5, 18]. При використанні блокових роздільних кодів до інформаційних елементів додаються перевірочні елементи, що забезпечує інформаційну надмірність повідомлення та дає можливість виявляти та/або виправляти помилки на приймальній стороні.

В РЛ діють гармонічні завади великої тривалості, що може призвести до одночасного спотворення кількох елементів КК, тобто до появи пакету помилок. У зв'язку з цим для забезпечення завадостійкості команд АЛС пропонуємо використовувати циклічний код Файра, так як він дає можливість виявляти та виправляти пакетні помилки.

Твірний поліном коду Файра $G_{\phi}(x)$ визначається наступним чином [4]:

$$G_{\phi}(x) = G(x)(x^c \oplus 1). \quad (8)$$

де $G(x)$ – незвідний поліном ступеня t ; c – постійне число, яке не повинно ділитись без остачі на число $m = 2^t - 1$.

Ступені поліномів t та c обираються з урахуванням довжини можливих пакетів помилок. Припустимо, що $t = 2$, $c = 4$. Для обраних значень $m = 3$. Число c не ділиться без остачі на m , що задовольняє вимогам до (8).

Обираємо незвідний поліном другого ступеня $G(x) = x^2 \oplus x \oplus 1$ [4]. Відповідно до виразу (8) визначаємо твірний поліном коду Файра:

$$\begin{aligned} G_{\phi}(x) &= (x^2 \oplus x \oplus 1)(x^4 \oplus 1) = \\ &= x^6 \oplus x^5 \oplus x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1. \end{aligned} \quad (9)$$

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Обраний код Файра дає змогу [4]:

1) виявити будь-який одиничний пакет помилок із довжиною, що не перевищує $\rho = c + 1 = 5$;

2) виявити будь-яку комбінацію із двох пакетів помилок, довжина найменшого з яких не перевищує $t = 2$, а сума обох пакетів не перевищує $\rho = c + 1 = 5$.

Загальна кількість елементів КК визначається як найменше спільне кратне чисел m та c

$$n = HCK(m, c) = HCK(3, 4) = 12, \quad (10)$$

а кількість перевірочних елементів $r = t + c = 6$.

Таким чином, для передачі команд багатозначної системи АЛС пропонуємо використовувати циклічний код Файра (12,6), твірний поліном якого заданий виразом (9). Кожна двійкова комбінація такого коду містить шість інформаційних елементів, що відповідає умові (7). Обраний формат коду дає змогу передавати $2^6 = 64$ різних повідомлення. Це надає можливість розширити систему команд АЛС, запропоновану в роботі [13]. Зокрема, можна додати команди для передачі постійних обмежень швидкості з урахуванням особливостей залізничної ділянки, інформації про вільність або зайнятість залізничних переїздів, до яких наближається поїзд, та інше.

Схема модуляції. В системі АЛСН застосовується амплітудна маніпуляція (ASK), яка порівняно з частотною (FSK) та фазовою (PSK) маніпуляціями є найменш завадозахищеною. FSK та PSK мають значно кращу стійкість до впливу завад. Проте, одним із недоліків FSK є широкий частотний спектр маніпульованого сигналу, який займає суттєво більшу смугу частот порівняно з ASK та PSK [4].

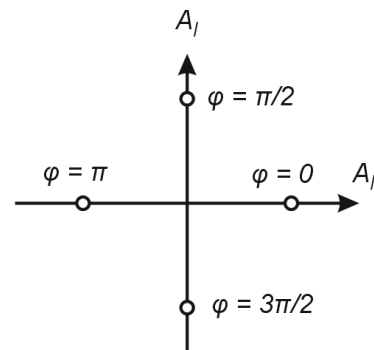
Спектр сигналу АЛС розташовується між гармонік тягового струму, частоти яких кратні значенню 50 Гц. При цьому з урахуванням перехідних ділянок амплітудно-частотної характеристики локомотивного фільтру ширина спектру сигналу АЛС не може перевищувати 25...30 Гц. Через це використовувати частотну модуляцію в системі АЛС недоцільно.

Для передачі сигналів АЛС через РЛ пропонуємо використовувати завадостійку квадратурну фазову маніпуляцію QPSK. Для спрощення процесу демодуляції сигналу обираємо диференціальну фазову маніпуляцію DQPSK, при

якій інформаційним параметром є не абсолютне значення початкової фази, а відносний фазовий зсув між двома сусідніми символами [3, 4, 7].

Сигнальне сузір'я для маніпуляції QPSK та приклад фазо-маніпульованого сигналу представлені на рис. 2. Фаза несучого сигналу може приймати одне з чотирьох значень, що дає змогу передавати два біта інформації за один символ. Таким чином, при використанні QPSK інформаційна швидкість вдвічі більше ніж швидкість передачі символів.

а – а



б – б

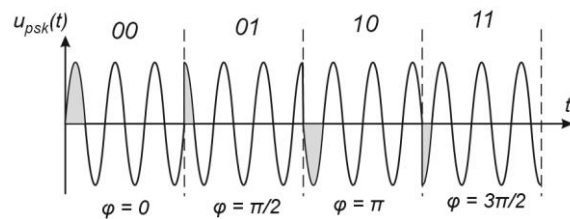


Рис. 2. Сигнальне сузір'я для схеми модуляції QPSK (а) та приклад фазо-маніпульованого сигналу (б)

Fig. 2. Signal constellation for QPSK modulation scheme (a) and example of phase-shift keyed signal (b)

Виберемо параметри QPSK сигналу АЛС. Частоти несучого сигналу систем АЛСН, які використовуються в Україні, дорівнюють 25 або 75 Гц. Для забезпечення можливості одночасного застосування рішення, запропонованого в даній роботі, та існуючих систем АЛСН, обираємо частоту несучого сигналу 125 Гц, яка розташовується між гармонік тягового струму 100 та 150 Гц. Таким чином пропонуємо наступні параметри QPSK сигналу АЛС:

- 1) частота несучого сигналу – 125 Гц;
- 2) ефективна ширина спектру – 20 Гц;
- 3) символна швидкість – 10 симв/с;
- 4) інформаційна швидкість (R) – 20 біт/с.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Визначимо час передачі одного повідомлення довжиною $n = 12$ біт:

$$T_{ц} = \frac{n}{R} = \frac{12 \text{ біт}}{20 \text{ біт/с}} = 0,6 \text{ (с)}. \quad (11)$$

Запропонована в даній роботі система дає змогу передавати одну із 64-х команд АЛС за 0,6 с, в той час як система АЛСН забезпечує передавання однієї з трьох команд за 5...6 с (тривалість трьох циклів кодового трансмітера). Таким чином, впровадження запропонованого рішення дозволить отримати значно кращі інформативність та швидкодію порівняно з АЛСН.

Результати

Для дослідження завадостійкості запропонованої системи на рівні повідомлень виконано моделювання методом Монте Карло. Відповідний програмний код написаний мовою Python. При проведенні моделювання обрано наступні параметри:

- 1) кількість інформаційних елементів в кожній КК – $k = 6$;
 - 2) кількість перевірочних елементів в КК – $r = 6$;
 - 3) твірний поліном коду Файра – $G_{\Phi}(x)$ відповідно до виразу (9);
 - 4) кількість ітерацій для кожної кратності помилки – $N_{\text{заг}} = 10^6$;
 - 5) кратності помилок – $l_{\text{пом}} = 1 \dots 12$.
- Моделювання проводили за наступним алгоритмом:

- 1) задати кратність помилки $l_{\text{пом}} = 1$;
- 2) сформувати 12-ти елементний двійковий вектор помилки $\bar{\xi}_i$, в якому кількість одиниць дорівнює $l_{\text{пом}}$, а розташування одиниць – випадкове (за рівномірним законом розподілу);
- 3) генерувати випадкову шестибітну інформаційну КК \bar{u}_i ;
- 4) утворити завадостійку КК \bar{v}_i шляхом застосування кодування кодом Файра до \bar{u}_i за допомогою твірного поліному $G_{\Phi}(x)$;
- 5) обчислити КК на вході декодера $\hat{\bar{v}}_i$ як $\hat{\bar{v}}_i = \bar{v}_i \oplus \bar{\xi}_i$;
- 6) обчислити синдром помилки \bar{s}_i шляхом декодування $\hat{\bar{v}}_i$ за допомогою твірного поліному $G_{\Phi}(x)$;
- 7) якщо $\bar{s}_i \neq 0$, то врахувати помилку як невиявлену;
- 8) виконати кроки 2)–7) $N_{\text{заг}}$ разів;
- 9) обчислити коефіцієнт невиявлення помилок:

$$K_{\text{нев}} = \frac{N_{\text{нев}}}{N_{\text{заг}}}. \quad (12)$$

де $N_{\text{нев}}$ – кількість невиявлених помилок;
 $N_{\text{заг}}$ – загальна кількість КК з помилками.

- 10) виконати кроки 2)–9) для $l_{\text{пом}} = (2, 3, \dots, 12)$.

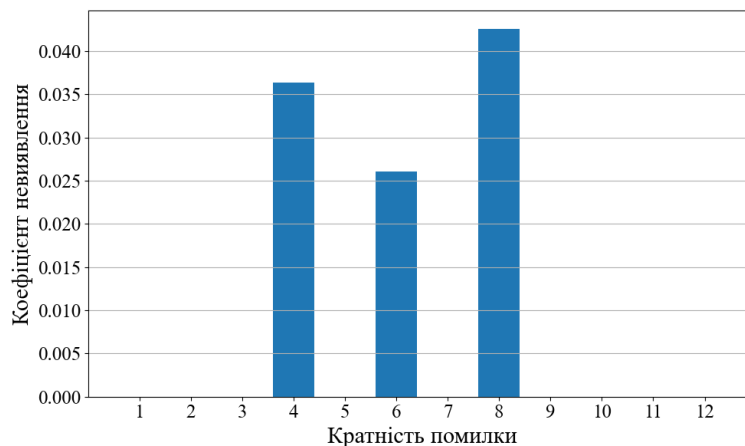


Рис. 3. Залежність коефіцієнту невиявлення від кратності помилок для коду Файра (12,6)

Fig. 3. Dependence of the non-detection coefficient on the error rate for the Fire code (12.6)

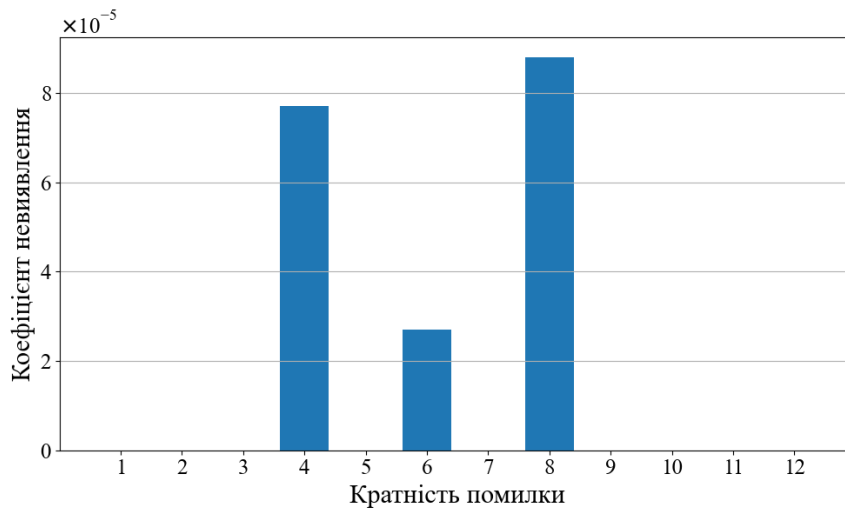


Рис. 4. Залежність коефіцієнту невиявлення від кратності помилок при використанні коду Файра (12,6) та двократного прийому повідомлень

Fig. 4. Dependence of the non-detection coefficient on the error rate when using the Fire code (12,6) and double message receiving

Отримана в результаті моделювання залежність коефіцієнту невиявлення від кратності помилок представлена на рис. 3 та у табл. 1. Відповідно до результатів моделювання, код Файра (12,6) виявляє всі помилки крім чотирикратних, шестикратних та восьмикратних. Загальний коефіцієнт невиявлення (відношення кількості всіх невиявлених помилок будь-якої кратності до загальної кількості ітерацій $12N_{\text{заг}}$) дорівнює 0,0087.

В системах АЛС неперервної дії в межах блок-ділянки через рейкову лінію передається одна й та сама команда доки поїзна ситуація залишається без змін. Це створює умови для багатократного прийому кожної команди: рішення про отримання певної команди АЛС приймається тільки після того, як відповідна КК буде декодована без помилок кілька разів поспіль.

На рис. 4 та у табл. 1 представлені результати моделювання у разі використання коду Файра (12,6) та двократного прийому кожної команди. Як видно, завадостійкість суттєво покращилась: загальний коефіцієнт невиявлення помилок складає $1,6 \cdot 10^{-5}$. При моделюванні системи з трикратним прийомом команд випадків невиявлення помилок не зафіксовано.

Таблиця 1

Результати моделювання

Table 1

Simulation results

Кратність помилок	Коефіцієнт невиявлення	
	однократний прийом	двократний прийом
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0,0362	$7,7 \cdot 10^{-5}$
5	0	0
6	0,0263	$2,7 \cdot 10^{-5}$
7	0	0
8	0,0422	$8,8 \cdot 10^{-5}$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Наукова новизна та практична значимість

Авторами цієї роботи запропоновано комплекс рішень для вдосконалення неперервної системи автоматичної локомотивної сигналізації: збільшення ентропії джерела; зменшення інформаційних втрат завдяки застосуванню завадостійкого коду Файра та чотирипозиційної фазової маніпуляції; підвищення частоти передачі повідомлень та багатократний прийом.

Впровадження запропонованих рішень дозволить підвищити ємність та завадостійкість каналу передачі даних через рейкову лінію, розширити систему команд АЛС з урахуванням обмежень швидкості на станціях, інформації про встановлену швидкість для швидкісних залізничних ліній, а також постійних обмежень відповідно до особливостей залізничних ділянок.

Висновки

1. Система автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН, яка застосовується в Україні, має низьку інформативність, високу інерційність та низьку завадостійкість, реалізована на застарілій елементній базі. Один із напрямів вдосконалення системи АЛС пов'язаний із за-

стосуванням більш досконалих методів передачі даних.

2. Запропонована в даній роботі система дає змогу передавати на локомотив одну із 64-х команд АЛС. В тому числі інформацію про обмеження швидкості на станціях, а також інформацію про поточну поїзну ситуацію на перегоні з урахуванням можливого збільшення швидкостей до 250 км/год. Для забезпечення високої завадостійкості кожна команда кодується кодом Файра (12,6). Крім цього, для передачі команд через РЛ пропонується використовувати завадостійку квадратурну фазову маніпуляцію.

3. Завадостійкість запропонованої системи на рівні повідомлень підтверджується результатами імітаційного моделювання. Отримано залежність загального коефіцієнту невиявлення від кратності прийому кожної команди АЛС: при однократному прийомі – 0,0087, двократному – $1,6 \cdot 10^{-5}$, трикратному – невиявлення помилок не зафіксовано.

4. Дана робота передбачає проведення подальших досліджень за наступними напрямками: моделювання РЛ як лінії зв'язку, визначення ширини її смуги пропускання; дослідження завад, що діють в РЛ; дослідження інших завадостійких кодів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гололобова О. О., Буряк С. Ю., Гаврилюк В. І., Маркуль Р. В., Афанасов А. М., Білухін Д. С. Визначення причин порушень у роботі автоматичної локомотивної сигналізації. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6(96). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/257914>
2. ДСТУ ISO/IEC 2382:2017. Інформаційні технології. Словник термінів. (ISO/IEC 2382:2015, IDT). [Чинний від 2017-12-19]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 464 с.
3. Дудар О., Мішан В., Горященко К. Моделювання сигналів QPSK в середовищі SIMULINK. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*. 2023. Том 327, № 5(2). С. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-167-172>
4. Кузьмін І. В., Троцишин І. В., Кузьмін А. І., Кедрус В. О., Любчик В. Р. *Основи теорії інформації та кодування* : підручник / за ред. І. В. Кузьміна ; вид. 3-тє., переробл. та допов. Хмельницький : ХНУ, 2009. 373 с.
5. Мартинюк Т., Войналович О. Класифікаційна модель методів цифрового кодування. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2024. Том 47, № 1. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-42-49>
6. Сотник В. О., Бабаєв М. М., Чепцов М. М. Нейромережева модель розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2013. № 36. С. 67–79.
7. Ali A., Chimen M. F., Azpúrua M. A. Resilience of QPSK Radio Links Under Narrowband and Broadband Electromagnetic Interferences. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024. Vol. 5. P. 2391–2400. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2024.3387339>

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

8. Alvarenga T. A., Cerqueira A. S., Filho L. M. A., Nobrega R. A., Honorio L. M., Veloso H. Identification and Localization of Track Circuit False Occupancy Failures Based on Frequency Domain Reflectometry. *Sensors*. 2020. Vol. 20, Iss. 24. P. 7259. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247259>
9. Havryliuk V. Detecting of Signal Distortions in Cab Signaling System Using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. (Istanbul, 7–11 Sep. 2020). Istanbul, 2020. P. 231–236. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263165>
10. Havryliuk V., Radzikhovskiy K., Voznyak O. Monitoring of distortions and interferences in ASK-modulated currents of railway signaling systems. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002004>
11. Higuchi R., Mochizuki H., Nakamura H., Ishikawa R., Sano M., Nishida S. Application of OFDM transmission method for railway signaling system via track circuit. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1780, № 1. P. 012037. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1780/1/012037>
12. Hololobova O. O., Havryliuk V. I. Application of Fourier transform and Wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code. *Science and Transport Progress*. 2017. № 1(67). C. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92771>
13. Honcharov K. V., Rybalka R. V. Multi-Valued Automatic Cab Signaling System Based on the CDMA Technology. *Science and Transport Progress*. 2021. № 6(96). C. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258171>
14. Hsiao L.-S., Lin I.-L. Integrating 5G and Terrestrial Trunked Radio into Railway Communication System for Railway Safety and Information Security. *Sensors and Materials*. 2024. Vol. 36, № 3. P. 1275–1285. DOI: <https://doi.org/10.18494/sam4875>
15. Knutsen D., Olsson N. O. E., Fu J. ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*. 2023. Vol. 6, № 1. P. 34–45. DOI: <https://doi.org/10.26599/jicv.2023.9210003>
16. Knutsen D., Olsson N. O. E., Fu J. Capacity evaluation of ERTMS/ETCS hybrid level 3 using simulation methods. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2024. Vol. 30. 100444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100444>
17. Liu S., Yang S., Liu C., Liu T., Xiong Q. Research on Anti-interference Algorithm for Cab Signal Demodulation Based on Deep Learning. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. Shenzhen, China. 2020. P. 248–254. DOI: <https://doi.org/10.1109/icarcv50220.2020.9305349>
18. Moon K. *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. Hoboken, New Jersey : Wiley-Interscience, 2005. 800 p.
19. Rosberg T., Thorslund B. Radio communication-based method for analysis of train driving in an ERTMS signaling environment. *European Transport Research Review*. 2022. Vol. 14, Iss. 18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00542-5>
20. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg : Eurailpress, 2009. 448 p.
21. Vatakov V., Pencheva E., Dimitrova E. New Radio and Internet of Things Technologies for Future Railway Communications. *2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM)*. Sofia, Bulgaria. 2022. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/telecom56127.2022.10017323>

K. V. HONCHAROV^{1*}, R. V. RYBALKA^{2*}, V. V. MALOVICHKO^{3*}

^{1*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail k.v.honcharov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0432-1077

^{2*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517

^{3*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail v.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0008-2704-5555

Increasing the Capacity and Interference Immunity of the Data Transmission Channel in the Automatic Cab Signalling System

Purpose. Improvement of the automatic cab signaling (ACS) system by increasing the capacity and interference immunity of the data transmission channel based on the rail line. **Methodology.** To achieve the purpose, the analysis of existing solutions for improving the automatic cab signaling system has been performed. The comparative assessment of capacity the data transmission channel in the automatic cab signaling system ALSN with numerical coding and the potential capacity of the channel based on the rail line has been carried out. The system of commands of the multi-valued ACS has been proposed, that in addition to traditional ALSN commands, allows transmitting to the locomotive information about speed limits at stations, permanent restrictions according to the characteristics of railway sections, as well as information about the current train situation on the section, taking into account the possible increase in speeds to 250 km/h. To increase the interference immunity of the data transmission channel, it was proposed to use Fire code and quadrature phase shift keying QPSK. The generator polynomial of the Fire code has been determined, the information rate and transmission time of one command have been calculated. **Findings.** To study the interference immunity of proposed system, the simulation model has been developed, the program code of which is written in Python. It was determined that the Fire code (12,6) is guaranteed to detect all errors except for quadruple, sixfold and eightfold. To eliminate such errors, it is proposed to perform multiple receiving of each command. According to the simulation results, the total non-detection coefficient for single reception is 0.0087, for double reception is $1.6 \cdot 10^{-5}$. In the case of triple reception, no errors were detected during the simulation. **Originality.** The authors of this work proposed a set of solutions for improving the continuous system of automatic cab signaling: increasing the source entropy; reducing information losses by using the error-correcting Fire code and quadrature phase shift keying; increasing the frequency of message transmission and multiple receiving. **Practical value.** The implementation of the proposed solutions will allow increasing the capacity and interference immunity of the data transmission channel based on the rail line, expanding the ACS command system taking into account speed limits at stations, information about the set speed for high-speed railway lines, as well as permanent restrictions in accordance with the characteristics of railway sections.

Keywords: automatic locomotive signaling; rail line; transmission channel capacity; source entropy; noise-resistant coding; Fire code; four-position phase manipulation; simulation modeling

REFERENCES

- Hololobova, O. O., Buriak, S. Yu., Havryliuk, V. I., Markul, R. V., Afanasov, A. M., & Bilukhin, D. S. (2021). Determination of the Origin of Failures in the Operation of the Automatic Locomotive Signaling. *Science and Transport Progress*, 6(96), 5-13. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/257914> (in Ukrainian)
- Informatsiini tekhnologii. Slovnyk terminiv, 464 DSTU ISO/IEC 2382:2017.* (2017). (in Ukrainian)
- Dudar, O., Mishan, V., & Horiashchenko, K. (2023). Modeling QPSK Signals in SIMULINK Environment. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 327(5(2)), 167-172. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-167-172> (in Ukrainian)
- Kuzmin, I. V., Trotsyshyn, I. V., Kuzmin, A. I., Kedrus, V. O., & Liubchik, V. R. (2009). *Osnovy teorii informatsii ta koduvannia.* Khmelnytskyi: KhNU. (in Ukrainian)
- Martyniuk, T., & Voinalovych, O. (2024). Classification model of digital coding methods. *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 47(1), 42-49. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-42-49> (in Ukrainian)
- Sotnyk, V. O., Babaiev, M. M., & Cheptsov, M. M. (2013). Neiomerezheva model rozpoznavannia tryvalosti impulsiv ta intervaliv kodiv ALSN. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT*, 36, 67-79. (in Ukrainian)
- Ali, A., Chimeno, M. F., & Azpúrua, M. A. (2024). Resilience of QPSK Radio Links Under Narrowband and Broadband Electromagnetic Interferences. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 2391-2400. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2024.3387339> (in English)
- Alvarenga, T. A., Cerqueira, A. S., Filho, L. M. A., Nobrega, R. A., Honorio, L. M., & Veloso, H. (2020). Identification and Localization of Track Circuit False Occupancy Failures Based on Frequency Domain Reflectometry. *Sensors*, 20(24), 7259. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247259> (in English)
- Havryliuk, V. (2020). Detecting of Signal Distortions in Cab Signalling System Using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* (pp. 231-236), Istanbul, Turkey. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263165> (in English)

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

10. Havryliuk, V., Radzikhovskiy, K., & Voznyak, O. (2024). Monitoring of distortions and interferences in ASK-modulated currents of railway signaling systems. *MATEC Web of Conferences*, 390, 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002004> (in English)
11. Higuchi, R., Mochizuki, H., Nakamura, H., Ishikawa, R., Sano, M., & Nishida, S. (2021). Application of OFDM transmission method for railway signaling system via track circuit. *Journal of Physics: Conference Series*, 1780(1), 012037. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1780/1/012037> (in English)
12. Hololobova, O. O., & Havryliuk, V. I. (2017). Application of Fourier transform and Wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code. *Science and Transport Progress*, 1(67), 7-17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92771> (in English)
13. Honcharov, K. V., & Rybalka, R. V. (2021). Multi-Valued Automatic Cab Signalling System Based on the CDMA Technology. *Science and Transport Progress*, 6(96), 14-21. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258171> (in English)
14. Hsiao, L.-S., & Lin, I.-L. (2024). Integrating 5G and Terrestrial Trunked Radio into Railway Communication System for Railway Safety and Information Security. *Sensors and Materials*, 36(3), 1275-1285. DOI: <https://doi.org/10.18494/sam4875> (in English)
15. Knutsen, D., Olsson, N. O. E., & Fu, J. (2023). ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, 6(1), 34-45. DOI: <https://doi.org/10.26599/jicv.2023.9210003> (in English)
16. Knutsen, D., Olsson, N. O. E., & Fu, J. (2024). Capacity evaluation of ERTMS/ETCS hybrid level 3 using simulation methods. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 30, 100444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100444> (in English)
17. Liu, S., Yang, S., Liu, C., Liu, T., & Xiong, Q. (2020). Research on Anti-interference Algorithm for Cab Signal Demodulation Based on Deep Learning. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (pp. 248-254). Shenzhen, China. DOI: <https://doi.org/10.1109/icarcv50220.2020.9305349> (in English)
18. Moon, K. (2005). *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. (in English)
19. Rosberg, T., & Thorslund, B. (2022). Radio communication-based method for analysis of train driving in an ERTMS signaling environment. *European Transport Research Review*, 14(18). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00542-5> (in English)
20. Theeg, G., & Vlasenko, S. (2009). *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg: Eurailpress. (in English)
21. Vatakov, V., Pencheva, E., & Dimitrova, E. (2022). New Radio and Internet of Things Technologies for Future Railway Communications. *2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM)* (pp. 1-4). Sofia, Bulgaria. DOI: <https://doi.org/10.1109/telecom56127.2022.10017323> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.08.2025

Прийнята до друку: 15.12.2025

UDC [629.423:621.382]-048.24A. V. ZUBKO^{1*}

¹Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail andrii.v.zubko@gmail.com, ORCID 0009-0001-1861-5017

Level-Based Classification of Electromagnetic Effects in Certification Tests of Electric Rolling Stock

Purpose. To develop a conceptual framework for interpreting the results of electromagnetic compatibility (EMC) certification tests of electric rolling stock using a multi-level classification system. The study aims to establish a structured method for distinguishing different states of electromagnetic influence based on measured parameters of amplitude and duration, thereby improving the representation and understanding of test data within existing certification procedures. **Methodology.** Existing approaches to electromagnetic compatibility testing and data interpretation in railway applications were analyzed to identify limitations in differentiating levels of electromagnetic influence. A structured method for precise classification is proposed, based on normalized comparison of interference characteristics. The developed framework defines transition zones between safe and potentially critical operating conditions and allows flexible adaptation of threshold parameters depending on test conditions. This ensures compliance with certification requirements while enhancing the diagnostic depth and informativeness of the results. **Findings.** A multi-level classification system for electromagnetic interference has been developed, providing a comprehensive representation of EMC test results. The approach enables identification of transitional states and trends toward critical operating conditions that are not detectable under a dichotomous evaluation scheme. It allows a more accurate interpretation of test outcomes, supports early diagnostics of instability, and provides a quantitative basis for assessing the operational resilience of railway systems. **Originality.** A systematic, multi-level framework for interpreting EMC test results of electric rolling stock has been developed. Unlike conventional methods limited to threshold verification, the proposed approach accounts for the dynamics of parameter variations and their interdependencies, enabling predictive analysis and a more complete understanding of electromagnetic behavior under various operating conditions. **Practical value.** The developed methodology enhances the accuracy, transparency, and reliability of certification testing for electric locomotives, multiple-unit trains, and other electrically powered rolling stock. It contributes to safer and more efficient railway operation by providing engineers and certification authorities with a comprehensive analytical framework for assessing electromagnetic compatibility. The approach is applicable for optimizing design solutions, refining certification criteria, and supporting the modernization of railway infrastructure.

Key words: electromagnetic compatibility; multi-level classification; certification testing; rolling stock; interference analysis; traction current; predictive diagnostics; monitoring; operational safety; risk assessment

Introduction

Modern railway systems are characterized by a rapid increase in the level of digitalization and integration of electronic components. In train control and centralized traffic control systems, microprocessor-based controllers, converters, diagnostic units, and communication systems are widely used. This enhances their functionality but simultaneously complicates the electromagnetic operating environment. The growing density of electronic devices within the limited spaces of rolling stock increases the number of potential sources of interference, while the transition to hybrid and digital power supply circuits strengthens the requirements for electromagnetic compatibility (EMC). Under

these conditions, ensuring the stability and reliability of electronic system operation becomes a critical factor for traffic safety.

Certification testing of electric rolling stock for electromagnetic compatibility occupies a key position in the railway transport safety assurance system. Such tests are conducted to confirm the ability of electric locomotives, electric multiple units, and other types of electrically powered rolling stock (hereinafter referred to as ERS) to operate within a complex electromagnetic environment without causing mutual interference with infrastructure elements – including signaling, interlocking, and power supply systems, as well as communication equipment [1, 2, 7, 16].

The purpose of these tests is to determine whether the electric rolling stock generates inadmissible electromagnetic emissions affecting surrounding equipment, while maintaining its own immunity to external electromagnetic fields.

Certification tests are carried out in accordance with international standards such as IEC 62236, CLC/TS 50238–2, and EN 50728, which define the measurement procedures, control parameters, and permissible levels of electromagnetic disturbances [5, 6, 8, 9, 10–13, 14].

During testing, both radiated and conducted emissions, as well as the electromagnetic immunity of systems under various power supply and load conditions, are assessed. The results obtained make it possible to confirm compliance with established norms and thereby ensure the safe and reliable operation of ERS as part of the railway system. However, the existing practice of interpreting test results is primarily based on a binary principle – the tested object is either considered compliant with the requirements or not [4, 15].

This approach, based on a dichotomous evaluation model (or binary classification scheme), ensures the formal completion of certification procedures but does not always reflect the full complexity of electromagnetic interactions occurring under real operating conditions.

Despite its simplicity and clarity, the dichotomous evaluation system has significant limitations in terms of analytical informativeness. It does not allow identification or recording of intermediate states where the level of electromagnetic influence approaches the permissible limits but has not yet formally exceeded them. In such cases, the equipment is considered “compliant”, although the actual interference level may already pose a potential threat to the stable operation of signaling and control systems. The absence of gradations between acceptable and unacceptable states leads to the loss of valuable diagnostic information, limits predictive capabilities, and reduces the effectiveness of preventive measures. This, in turn, highlights the need to transition toward more detailed and informative methods for interpreting the results of certification testing.

Purpose

The objective of this research is to develop a conceptual framework for a multi-level approach to the interpretation of EMC test results for electric

rolling stock. The proposed approach is aimed at enhancing the informational value of electromagnetic impact assessment without requiring any modifications to the existing regulatory framework. It supplements the current binary evaluation system with more detailed interpretive levels, thereby providing a deeper understanding of the actual electromagnetic stability of the tested objects.

The primary goal of the study is to establish a method that enables the identification of transitional zones between acceptable and critical operating conditions, the evaluation of EMC parameter dynamics under various power supply scenarios, and the utilization of the resulting data to refine engineering decisions and improve certification requirements.

This research does not intend to revise existing standards but rather focuses on advancing analytical and interpretative methods within the framework of current requirements. The main attention is given to the interaction between electric rolling stock and signaling, interlocking, and communication systems, where ensuring electromagnetic compatibility is of critical importance for traffic safety and the operational stability of infrastructure elements.

To enhance the informativeness of EMC test result analysis, a multi-level classification system for electromagnetic impact states is proposed. Unlike the traditional dichotomous model, the suggested approach introduces four evaluation levels that reflect not only compliance with normative limits but also the degree of proximity to threshold values and instances of their exceedance.

Such differentiation allows for the consideration of transitional states, the detection of trends indicating the deterioration of the electromagnetic environment, and timely responses to potentially hazardous conditions. Each level represents the degree of parameter deviation from permissible values and characterizes the potential risk to the operation of signaling and control systems, as well as other electronic components of the electric rolling stock.

Methodology

Analysis parameters. The parameters considered in the analysis include the root mean square (RMS) amplitude of the harmonic components of current I , representing the intensity of electrical disturb-

АВТОМАТИЗОВАНИ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

ances, and the duration of disturbance t (in seconds), representing the time interval during which the amplitude exceeds the threshold value.

For quantitative interpretation of the levels of electromagnetic influence, normalized quantities of current and duration of interference are introduced:

- I_{lim} – normative (limit) value of current, A,
- t_{lim} – normative (limit) value of duration, sec.

The values of I_{lim} and t_{lim} are obtained from the standardized tables of harmonic current components for different power supply systems of electric locomotives and electric multiple units – namely, 3 kV DC, 25 kV AC at 50 Hz, and combined systems. These data are based on the requirements of the corresponding standard, which defines the permissible levels of harmonic components and the limiting values of electromagnetic disturbances within the relevant frequency bands associated with the nominal signal frequencies of signaling and interlocking equipment (Table 1) [1, 3, 5].

Table 1

Permissible values of harmonic current components for electric locomotives and electric multiple units

Power supply system	Harmonic frequency band, Hz	Nominal signal frequency, Hz	RMS harmonic current in band, max	
3 kV DC	19–21	25	11.6	
	21–29		1.0	
	29–31		11.6	
	40–46	50	5.0	
	46–54		1.3	
	54–60		5.0	
	4 507–4 583	4 545	0.2	
	5 517–5 593	5 555	0.2	
	25 kV AC (50 Hz)	15–21	25	4.1
		21–29		1.0
29–35		4.1		
65–68		75	4.1	
4 462–4 538		4 500	0.2	
5 462–5 538		5 500	0.2	

Continuation of Table 1

Power supply system	Harmonic frequency band, Hz	Nominal signal frequency, Hz	RMS harmonic current in band, max
3 kV DC and 25 kV AC (50 Hz)	167–184	175	0.4
	408–432	420	0.35
	468–492	480	0.35
	568–592	580	0.35
	708–732	720	0.35
	768–792	780	0.35
	4 962–5 038	5000	0.2

The tables provided in the standard specify the root mean square (RMS) current levels calculated for all harmonic components simultaneously present within a given frequency band, for a disturbance duration exceeding 0.3 seconds. This duration criterion serves as the regulatory basis for determining the limiting value of disturbance duration t_{lim} , which is used for the normalization of exposure duration in the proposed classification system [3, 5].

The main evaluation parameters are as follows:

- harmonic component current – I ;
- maximum permissible current – I_{lim} ;
- disturbance duration – t ;
- maximum permissible duration – t_{lim} .

The following normalized parameters are introduced:

$$k_I = \frac{I}{I_{\text{lim}}};$$

$$k_T = \frac{t}{t_{\text{lim}}},$$

where k_I resents the relative exceedance of the current amplitude with respect to the permissible value and k_T denotes the relative exceedance of the disturbance duration.

Thus, the introduction of the variables k_I and k_T makes it possible to construct a classification system in which the system states are evaluated comprehensively according to two key characteris-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

tics – the magnitude of the harmonic current components and the duration of their impact. This provides a precise and unambiguous determination of the risk level associated with electromagnetic disturbances.

Levels of Stability and Risk. To analyze system stability, it is proposed to distinguish four stability levels depending on the amplitude and duration of electromagnetic disturbances.

Level 1 (Safe – Green) – the zone of stable operation, where both the amplitude of harmonic current components and the disturbance duration are significantly below the regulatory limits.

Condition of membership:

$$k_I \in (0, k_{I1}] \wedge k_T \in (0, k_{T1}],$$

where k_{I1} is the amplitude threshold coefficient defining the upper boundary of the safe zone and k_{T1} is the time threshold coefficient defining the maximum disturbance duration for this level.

Using the limiting current amplitude I_{lim} and limiting duration t_{lim} , the amplitude and duration corresponding to the safe level are determined as:

$$I_1 = k_{I1} \cdot I_{lim}; \quad (1)$$

$$t_1 = k_{T1} \cdot t_{lim}. \quad (2)$$

The values I_1 and t_1 represent the actual boundaries of the safe zone, within which the system operates stably and the observed disturbances do not have a significant impact on the equipment or signaling devices.

Level 2 (Advisory – Yellow) – the early warning stage, in which the amplitude of harmonic current components and the duration of the disturbance approach critical values but remain within the permissible range.

Condition of membership:

$$k_I \in (k_{I1}, k_{I2}] \wedge k_T \in (k_{T1}, k_{T2}],$$

where k_{I2} is the amplitude threshold coefficient defining the upper boundary of the advisory level and k_{T2} is the time threshold coefficient defining the maximum allowable duration for this level.

The real amplitude and duration for the advisory level are calculated as:

$$I_2 = k_{I2} \cdot I_{lim}; \quad (3)$$

$$t_2 = k_{T2} \cdot t_{lim}. \quad (4)$$

The values I_2 and t_2 define the boundary of the region in which the system still operates correctly but is approaching a state that requires monitoring and possible intervention to prevent transition into critical modes.

Level 3 (Pre-Critical – Red) – the heightened alert zone, where the amplitudes of harmonic components and the duration of disturbances are close to the limiting values but do not yet exceed the normative limits I_{lim} and t_{lim} .

At this stage, the system operates in a condition close to the critical state, requiring increased attention and parameter monitoring.

Condition of membership:

$$k_I \in (k_{I2}, 1] \wedge k_T \in (k_{T2}, 1].$$

Thus, the «Pre-Critical» level denotes a condition in which the influence of harmonic components and their exposure time reach the admissible limits, indicating the need for control and possible load reduction to avoid transition into the critical zone.

Level 4 (Critical – Black) – the danger zone, in which the amplitudes of harmonic components and the duration of disturbances exceed the regulatory limits.

This condition indicates that the system has exceeded the permissible values, which may lead to malfunctions in equipment or signaling and interlocking systems.

Condition of membership:

$$k_I \in (1, \infty) \wedge k_T \in (1, \infty).$$

Therefore, the “Critical” level corresponds to the state in which system parameters surpass the allowable norms, and operation occurs under conditions of potential danger to stability and reliability of the equipment.

To ensure the consistency of classification, the normalization coefficients for amplitude and duration are selected so as to satisfy the inequalities:

$$0 < k_{I1} < k_{I2} < 1; \quad (5)$$

$$0 < k_{T1} < k_{T2} < 1. \quad (6)$$

This guarantees a logical progression from the safe zone to the critical state. Such a dependence reflects the coherent variation of parameters: as the amplitude of harmonic components increases and the duration of the disturbance grows, the system gradually transitions to a higher risk level.

This relationship reflects the coherence in the variation of parameters: as the amplitude of the harmonic components increases and the duration of exposure grows, the system gradually transitions to a higher risk level.

The classification function for the risk level $L(I, t)$ takes the following form:

$$L(I, t) = \left. \begin{cases} 1, I \leq I_1 \wedge t \leq t_1 \\ 2, I_1 < I \leq I_2 \wedge t_1 < t \leq t_2 \\ 3, I_2 < I \leq I_{\text{lim}} \wedge t_2 < t \leq t_{\text{lim}} \\ 4, I > I_{\text{lim}} \wedge t > t_{\text{lim}} \end{cases} \right\}. \quad (7)$$

Findings

The input parameters for the classification are I_{lim} and t_{lim} – the limiting values of current and disturbance duration as regulated by the relevant standards [1, 3, 5].

The coefficients k_{I1} , k_{I2} , k_{T1} , k_{T2} are determined either experimentally or set by a specialist during testing, allowing the classification system to be adapted to actual operating conditions and the specific characteristics of the equipment.

This approach provides methodological flexibility: by adjusting the coefficient values, it is possible not only to modify the boundaries of existing classification levels but also to introduce additional levels if required for a more detailed assessment of system status, provided that the consistency of the inequalities between coefficients is maintained.

The proposed classification system enables the automatic determination of the criticality level of electromagnetic disturbances based on the measured amplitude and duration parameters I and t .

Figure 1 presents a binary representation of certification test results. The colored areas indicate regions corresponding to permissible and non-permissible values, providing a clear visual representation of the system's compliance with electromagnetic compatibility requirements.

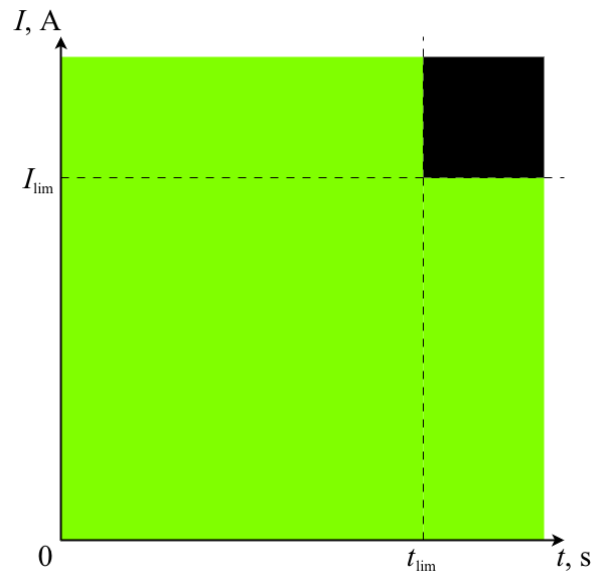


Fig. 1. Binary representation of certification test results showing compliance and non-compliance regions

Despite its visual clarity, the binary representation does not reflect the degree of proximity of the parameters to the threshold values and does not allow for a detailed assessment of the system state. In the figure, this is manifested as abrupt transitions between permissible and non-permissible zones, which complicates the analysis of trends and hidden dependencies in the data.

To increase informational content, a multi-level approach is employed, enabling a more precise classification of test results.

Figure 2 presents a multi-level representation of certification test results. Unlike the binary scheme, the multi-level approach provides a more detailed classification of the data, distributing parameter values across several ranges (Level 1–4) depending on the degree of compliance with regulatory requirements.

The use of color coding allows for a visual assessment not only of compliance or non-compliance but also of the degree of proximity of parameters to threshold values. This visualization method makes the structure of the results distribution more transparent, facilitating the analysis of trends, the identification of transitional areas, and the detection of potential risk zones.

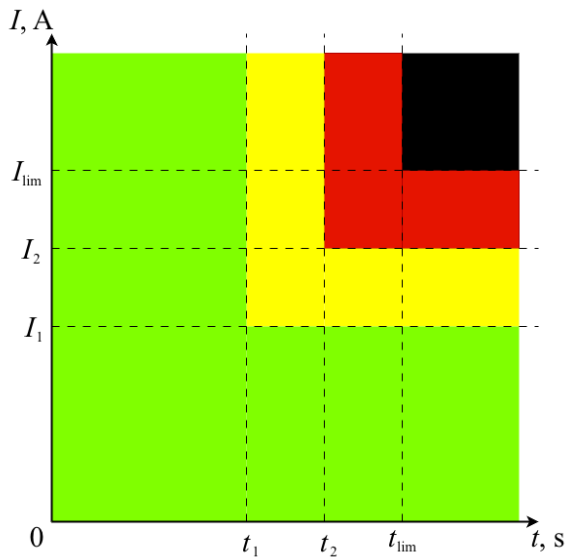


Fig. 2. Level-based representation of certification test results with color-coded Levels 1–4

Thus, the multi-level approach provides a foundation for a more flexible and informative interpretation of test results, offering enhanced support for engineering and certification decisions. When processing real test data, this approach enables a transition from the dichotomous “compliant / non-compliant” evaluation to a multi-level classification system, reflecting both the degree of proximity of parameters to threshold values and the dynamics of their change over time.

Practical application. Example calculation for frequency 420 Hz. To demonstrate the operation of the classification system, the following coefficients are proposed for the first two levels.

Level 1 (Safe):

$$k_{I1} = 0.9 ;$$

$$k_{T1} = 0.9 .$$

Level 2 (Advisory):

$$k_{I2} = 0.95 ,$$

$$k_{T2} = 0.95 .$$

The coefficients k_{I1} , k_{I2} , k_{T1} and k_{T2} were selected to satisfy the conditions (6) and (7).

For a frequency of 420 Hz, the following limiting values are established [1, 3, 5]:

$$I_{lim} = 0.35 \text{ (A)} ;$$

$$t_{lim} = 0.3 \text{ (sec)} .$$

Using the proposed coefficients k_{I1} and k_{T1} , the actual threshold values I_1 and t_1 for Level 1 are calculated according to formulas (1) and (2):

$$I_1 = k_{I1} \cdot I_{lim} = 0.9 \cdot 0.35 = 0.315 \text{ (A)} ;$$

$$t_1 = k_{T1} \cdot t_{lim} = 0.9 \cdot 0.3 = 0.27 \text{ (sec)} .$$

Using the proposed coefficients k_{I2} and k_{T2} , the actual threshold values I_2 and t_2 for Level 2 are calculated according to formulas (3) and (4):

$$I_2 = k_{I2} \cdot I_{lim} = 0.95 \cdot 0.35 = 0.333 \text{ (A)} ;$$

$$t_2 = k_{T2} \cdot t_{lim} = 0.95 \cdot 0.3 = 0.285 \text{ (sec)} .$$

Figure 3 presents the calculation results for 420 Hz using a linear scale, on which the boundaries of all classification levels are visually represented.

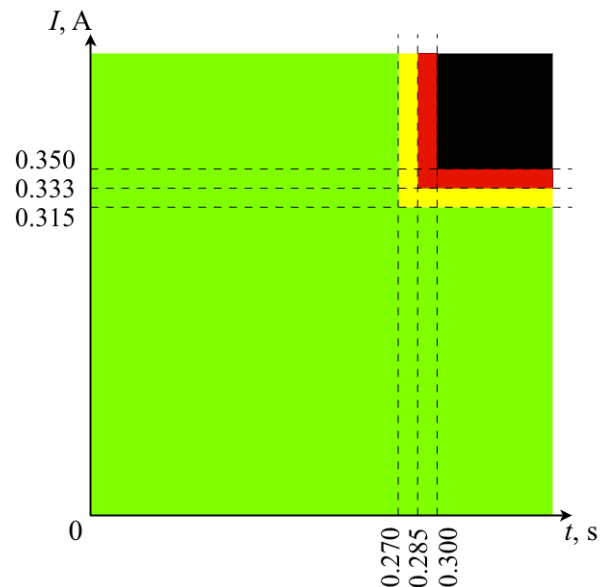


Fig. 3. Level-based visualization for 420 Hz showing calculated classification boundaries on a linear scale

Thus, the classification level zones for a frequency of 420 Hz are determined according to formula (7):

$$L_{420}(I, t) = \left\{ \begin{array}{l} 1, I \leq 0.315 \wedge t \leq 0.27 \\ 2, 0.315 < I \leq 0.333 \wedge 0.27 < t \leq 0.285 \\ 3, 0.333 < I \leq 0.35 \wedge 0.285 < t \leq 0.3 \\ 4, I > 0.35 \wedge t > 0.3 \end{array} \right\}$$

Originality and practical value

The proposed methodology for interpreting electromagnetic compatibility test results differs from traditional approaches by replacing the binary evaluation model – “compliant / non-compliant” – with a multi-level classification system. This approach allows for the consideration of the degree of proximity of parameters to threshold values, the duration of disturbances, and cumulative effects, providing a more detailed assessment of the system state during certification testing.

The scientific novelty of this work lies in the implementation of a multi-level analytical model that introduces several gradations of system state – from safe (green) to critical (black). This enables a more precise and informative differentiation of test results compared to the conventional dichotomous scheme.

The methodology is based on standardized normalized indicators of disturbance amplitude and duration and incorporates them within the framework of a level gradation system. This allows for comparison of measured results with regulatory limits, accounting for the degree of proximity to critical values, and forming a more accurate representation of EMC status throughout operational use.

The practical significance of the methodology lies in its ability to enhance the accuracy of analysis and the reliability of EMC diagnostics while remaining fully compatible with existing standards. The limiting values I_{lim} and t_{lim} are retained, while the introduced adjustable coefficients k_{I1} , k_{I2} , k_{T1} , k_{T2} allow the level boundaries to be adapted to real testing conditions, providing flexibility and scalability for different electric rolling stock systems and infrastructure.

Particularly important is the application of this method in operational monitoring. Data visualization in the form of level maps and zonal diagrams enables clear and timely representation of the EMC state.

This provides opportunities for:

- early detection of potential issues before parameters exceed threshold values,
- support for maintenance and preventive decision-making,
- integration into existing monitoring systems, where state levels can be updated automatically.

Thus, the methodology offers a scientifically grounded interpretation of test results and can be applied both in certification procedures and operational monitoring, providing an informative tool for assessing the EMC status of modern railway systems.

Conclusions

The developed methodology is aimed at improving the process of evaluating electromagnetic effects that arise during testing and certification of electric rolling stock. In modern power supply and control systems, even moderate electromagnetic disturbances can have a noticeable impact on the operation of electronic control units, safety systems, and diagnostic modules. This highlights the necessity of employing reliable and detailed analytical methods.

The proposed multi-level approach transcends the traditional dichotomous evaluation framework by introducing a graded classification system that accounts not only for the exceedance of regulatory limits but also for the degree of proximity of parameters to critical thresholds. This enables a more nuanced differentiation of the system’s condition and allows for the identification of pre-failure or potentially adverse scenarios before actual malfunctions occur.

The introduction of a tiered classification provides additional opportunities for forecasting the development of electromagnetic processes, assessing high-risk zones, and correctly interpreting the cumulative effects of interference. The methodology can be integrated into modern automated systems for monitoring and data analysis, thereby enhancing the accuracy of control, the speed of diagnostics, and the overall operational reliability of equipment.

Thus, the proposed approach represents an effective and scientifically grounded tool that ensures a comprehensive assessment of electromagnetic compatibility and contributes to improving the safety, resilience, and functional reliability of electrical systems in electric rolling stock.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гаврилюк В. И., Щека В. И., Мелешко В. В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5(59). С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55352>
2. Журавльов А. Ю., Саблін О. І., Щека В. І., Ящук К. І. Підвищення завадостійкості рейкових кіл в умовах впливу тягового струму. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2024. № 27. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2024/307339>
3. Analysis of the basic parameters for maintaining the technical and operational compatibility of the 1520 mm and 1435 mm gauge rail systems at the border of the Commonwealth of Independent States (CIS) and European Union (EU). *Organisation for Cooperation between Railways (OSJD). European Union Agency for Railways (ERA) Contact Group*. Brussels, 2011.
4. Andreas A. *Digital Filters: Analysis, Design, and Signal Processing Applications*. Columbus : McGraw Hill, 2018. 976 p.
5. *CLC/TS 50238-2:2020. Railway applications. Compatibility between rolling stock and train detection systems. Part 2: Compatibility with track circuits*. [Effective from 2020-07-10]. Official edition, 2020. 43 p.
6. *EN 50728:2024. Railway applications. Rolling stock. Testing for electromagnetic compatibility with track circuits*. [Effective from 2024-12-13]. Official edition, 2024. 98 p.
7. Garczarek A., Stachowiak D. Measurements and Analysis of Electromagnetic Compatibility of Railway Rolling Stock with Train Detection Systems Using Track Circuits. *Energies*. 2025. Vol. 18. Iss. 11. P. 2705. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112705>
8. Havryliuk V. I. Modelling of the return traction current harmonics distribution in rails for AC electric railway system. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. (Amsterdam, 27–30 August 2018). Amsterdam, 2018. P. 251–254. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485160>
9. Hu H., Liu Y., Li Y., He Z., Gao S., Zhu X., Tao H. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 32. Iss. 1. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>
10. *IEC 62236-1:2018. Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 1: General*. [Effective from 2024-02-09]. Official Edition, 2018. 44 p.
11. *IEC 62236-2:2018. Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world*. [Effective from 2018-02-09]. Official Edition, 2018. 86 p.
12. *IEC 62236-3-1:2018. Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock. Train and complete vehicle*. [Effective from 2018-02-15]. Official Edition, 2018. 63 p.
13. *IEC 62236-3-2:2018. Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Rolling stock. Apparatus*. [Effective from 2018-02-15]. Official Edition, 2018. 69 p.
14. Pous M., Azpuru A. M., Oliva J., Aragon M., Gonzalez I., Silva F. Full Time Domain EMI Measurement System Applied to Railway Emissions According to IEC 62236-3-1/EN 50121-3-1 Standards. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. (Amsterdam, 27–30 August 2018). Amsterdam, 2018. P. 260–266. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485173>
15. Salles R., Asplund R., Ronnberg S. Mapping and assessment of harmonic voltage levels for railway traction supply stations in Sweden. *Electric Power Systems Research*. 2025. Vol. 239. 111195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111195>
16. Zubko A. V., Shcheka V. I. Consideration of the Upper Error Bound of Measurement Complex in the Analysis of Digitized Signals. *Science and Transport Progress*. 2025. No. (2(110)). P. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/331095>

А. В. ЗУБКО^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта andrii.v.zubko@gmail.com, ORCID 0009-0001-1861-5017

Рівнева класифікація електромагнітного впливу у сертифікаційних випробуваннях електрорухомого складу

Мета. Розробка концептуальної основи для інтерпретації результатів сертифікаційних випробувань електромагнітної сумісності (ЕМС) електрорухомого складу із застосуванням багаторівневої системи класифікації. Розробка структурованого методу розрізнення різних станів електромагнітного впливу на основі вимірних параметрів амплітуди та тривалості. Покращення представлення та розуміння даних випробувань у рамках існуючих сертифікаційних процедур. **Методика.** Проаналізовано існуючі підходи до випробувань електромагнітної сумісності та інтерпретації даних у залізничних застосуваннях для виявлення обмежень у диференціації рівнів електромагнітного впливу. Структурований метод точної класифікації на основі нормалізованого порівняння характеристик перешкод. Визначення перехідних зони між безпечними та потенційно критичними режимами роботи, можливість гнучкої адаптації порогових параметри залежно від умов випробувань. Забезпечення відповідності сертифікаційним вимогам та підвищення діагностичної інформативності результатів. **Результати.** Розроблено багаторівневу систему класифікації електромагнітних перешкод, що забезпечує повне представлення результатів випробувань ЕМС. Ідентифікація перехідних станів та тенденції до критичних режимів, які не виявляються при використанні дихотомічної оцінки. Підвищення точності інтерпретації результатів випробувань, підтримка ранньої діагностики нестабільності та основа для кількісної оцінки експлуатаційної стійкості залізничних систем. **Наукова новизна.** Розроблено систематизовану багаторівневу методику інтерпретації результатів випробувань ЕМС електрорухомого складу. На відміну від традиційних методів, обмежених перевіркою порогових значень, запропонований підхід враховує динаміку змін параметрів та їх взаємозалежності, що дозволяє здійснювати прогнозний аналіз та отримувати більшого уявлення про електромагнітну поведінку в різних умовах експлуатації. **Практична значимість.** Розроблена методика підвищує точність, прозорість та надійність сертифікаційних випробувань електровозів, електропоїздів та іншого електричного рухомого складу. Сприяє більш безпечній та ефективнішій експлуатації залізниць, надаючи інженерам та сертифікаційним органам повну аналітичну основу для оцінки електромагнітної сумісності. Застосовування для оптимізації проектних рішень, удосконалення сертифікаційних критеріїв та підтримки модернізації залізничної інфраструктури.

Ключові слова: електромагнітна сумісність; багаторівнева класифікація; сертифікаційні випробування; рухомий склад; аналіз перешкод; тяговий струм; прогнозна діагностика; моніторинг; експлуатаційна безпека; оцінка ризиків

REFERENCE

1. Havryliuk, V. I., Shcheka, V. I., & Meleshko, V. V. (2015). Testing new types of rolling stock for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices. *Science and Transport Progress*, 5(59), 7-15. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55352> (in Russian)
2. Zhuravlov, A. Yu., Sablin, O. I., Shcheka, V. I., & Yashchuk, K. I. (2024). Track circuits interference resistance increase under the traction current influence. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 27, 35-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2024/307339> (in Ukrainian)
3. Analysis of the basic parameters for maintaining the technical and operational compatibility of the 1520 mm and 1435 mm gauge rail systems at the border of the Commonwealth of Independent States (CIS) and European Union (EU). (2011). *Organisation for Cooperation between Railways (OSJD). European Union Agency for Railways (ERA) Contact Group*. Brussels. (in English)
4. Andreas A. (2018). *Digital Filters: Analysis, Design, and Signal Processing Applications*. Columbus : McGraw Hill. (in English)
5. *Railway applications. Compatibility between rolling stock and train detection systems. Part 2: Compatibility with track circuits*, 43 CLC/TS 50238-2:2020. (2020). (in English)
6. *Railway applications. Rolling stock. Testing for electromagnetic compatibility with track circuits*, 98 EN 50728:2024. (2024). (in English)

АВТОМАТИЗОВАНИ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

7. Garczarek, A., & Stachowiak, D. (2025). Measurements and Analysis of Electromagnetic Compatibility of Railway Rolling Stock with Train Detection Systems Using Track Circuits. *Energies*, 18(11), 2705
DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112705> (in English)
8. Havryliuk, V. I. (27-30 August, 2018). Modelling of the return traction current harmonics distribution in rails for AC electric railway system. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. (pp. 251-254). Amsterdam. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485160> (in English)
9. Hu, H., Liu, Y., Li, Y., He, Z., Gao, S., Zhu, X., & Tao, H (2023). Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32(I). 1-19.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6> (in English)
10. *Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 1: General*, 44 IEC 62236-1:2018. (2018). (in English)
11. *Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world*, 86 IEC 62236-2:2018. (2018). (in English)
12. *Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock. Train and complete vehicle*, 63 IEC 62236-3-1:2018. (2018). (in English)
13. *Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Rolling stock. Apparatus*, 69 IEC 62236-3-2:2018. (2018). (in English)
14. Pous, M., Azpurua, A. M., Oliva, J., Aragon, M., Gonzalez, I., & Silva, F. (27-30 August, 2018). Full Time Domain EMI Measurement System Applied to Railway Emissions According to IEC 62236-3-1/EN 50121-3-1 Standards. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. (pp. 260-266). Amsterdam. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485173> (in English)
15. Salles, R., Asplund, R., & Ronnberg, S. (2025). Mapping and assessment of harmonic voltage levels for railway traction supply stations in Sweden. *Electric Power Systems Research*, 239. 111195.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111195> (in English)
16. Zubko, A. V., & Shcheka, V. I. (2025). Consideration of the Upper Error Bound of Measurement Complex in the Analysis of Digitized Signals. *Science and Transport Progress*, 2(110), 5-12.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/331095> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.08.2025

Прийнята до друку: 11.12.2025

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 628.16.067.1:519.87

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, В. В. КОЗАЧИНА², О. Ю. ГУНЬКО³, В. М. КУЗНЕЦОВ⁴,
О. В. ЗВОНАРЬОВА⁵

^{1*}Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

³Кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

⁴Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта gitann-vm@obz.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

⁵Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта zvonareva.olga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

Математичне моделювання процесу нейтралізації агресивної домішки у підземних водах: експрес модель

Мета. Одним з сучасних засобів захисту підземних вод при наявності агресивної домішки є використання проникних бар'єрів (reactive barrier). При проведенні проектних робіт важливо заздалегідь визначати ефективність проникних бар'єрів. Для рішення такої складної задачі потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. В роботі розглядається розробка чисельних моделей для розрахунку процесу нейтралізації агресивної домішки в потоці підземних вод за допомогою проникного бар'єру з урахуванням гідродинаміки течії. **Методика.** Гідродинаміка підземних вод описується двовимірним рівнянням (планова модель) фільтрації безнапірного потоку ґрунтових вод. Для моделювання процесу руху агресивної домішки в потоці ґрунтових вод використовується двовимірне рівняння конвективно-дисперсійного поширення забруднювача в безнапірному потоці підземних вод. Для чисельного інтегрування рівняння фільтрації ґрунтових вод використовуються дві кінцево-різницькі схеми розщеплення. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу агресивної домішки використовується схема розщеплення по фізичним процесам. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію розроблених чисельних моделей динаміки ґрунтових вод та масопереносу агресивної домішки. Розроблені комп'ютерні коди є інструментом для оперативного аналізу ефективності використання проникного бар'єру. **Наукова новизна.** Розглянуто рішення комплексної задачі геоміграції – рух агресивної домішки та її нейтралізація у проникному бар'єрі (reactive barrier). Для аналізу ефективності роботи проникного бар'єру розроблено чисельну модель динаміки підземних вод та масопереносу агресивної домішки в ґрунтових водах. На базі розроблених чисельних моделей розроблено комп'ютерні коди для проведення обчислювальних експериментів. Розроблені чисельні моделі дають можливість протягом одного робочого дня здійснити серію розрахунків для наукового обґрунтування параметрів проникного бар'єру. **Практична значимість.** Побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно вирішувати складні задачі в галузі охорони водних ресурсів від забруднення.

Ключові слова: фільтрація; геоміграція забруднення ґрунтових вод; масоперенос; математичне моделювання; проникний бар'єр

Вступ

Стічні води, що потрапляють у підземний потік зі сховищ (ставки-відстійники), можуть бути агресивними та з часом впливати на стійкість фундаменту споруд, підземні комунікації тощо. Таким чином, ймовірними є такі дві ситуації: перша – підтоплення території; друга – міграція агресивних речовин в підземному потоці. Хімічно забруднені ґрунтові води взаємодіють з фундаментами будівель. Інтенсивне забруднення ґрунтових вод також має місце при інфільтрації різного роду домішок в ґрунтові води від промислових майданчиків або при аварійних витоках на транспорті, підприємствах.

Тому, паралельно з задачею зниження рівня ґрунтових вод, виникає задача по захисту ґрунтових вод від хімічного забруднення. Для рішення даної задачі можуть використовуватись різні підходи. З точки зору геоміграції, дана задача відноситься до проблеми масопереносу. Рішення задач масопереносу здійснюється за допомогою чисельних та аналітичних моделей [1–6, 8–13].

Важливим питанням є розробка спеціалізованих моделей для комплексного рішення задач фільтрації та геоміграції.

Мета

Створення математичної моделі для розрахунку процесу нейтралізації агресивної домішки в потоці підземних вод за допомогою проникного бар'єру.

Методика

Розглядається планова задача фільтрації з урахуванням того, що в підземному водоносному шарі розташований проникний бар'єр. Рух ґрунтових вод описується рівнянням:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

де h – глибина ґрунтових; k – коефіцієнт фільтрації; μ – нестача насичення; h_m – середня глибина підземного потоку.

Компоненти вектору швидкості підземного потоку визначаються на базі закону Дарсі:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \frac{\partial h}{\partial y}. \quad (2)$$

Постановка крайових умов для рівняння (1) розглянута в [7].

Для експрес розрахунку використовується наступне рівняння фільтрації:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Граничні умови для рівняння (3) розглянути в [10].

Чисельна модель. Рішення рівняння (1) базується на методі розщеплення та використанні методу сумарної апроксимації. Різницеві рівняння мають вигляд:

– крок № 1:

$$\frac{h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (4)$$

– крок № 2:

$$\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[a \frac{h_{i+1,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[a \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right], \quad (5)$$

де $a = \frac{kh_m}{\mu}$.

Для практичної реалізації даної чисельної моделі розроблено комп'ютерний код, мова програмування FORTRAN.

Чисельне рішення рівняння (3) базується на використанні локально-одновимірної різницевої схеми. Для цього використовується не саме рівняння (3), а його «еволюційний» вигляд.

Для чисельного інтегрування рівняння фільтрації (3) здійснюється попередній запис його у вигляді нестационарного рівняння:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}. \quad (6)$$

Далі здійснюється розщеплення цього рівняння. Схема розщеплення має вигляд:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}; \quad (7)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}. \quad (8)$$

У різницевому вигляді схема записується так:

– крок № 1:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \frac{h_{i+1,j}^n - h_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

– крок № 2:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Умовою закінчення розрахунку є наступна:

$$|h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

де $\varepsilon = 0,01$.

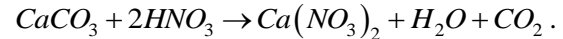
Розрахунок за даною чисельною моделлю здійснюється на базі розробленої комп'ютерної програми, мова програмування FORTRAN.

Модель руху агресивної домішки. Для визначення концентрації агресивної домішки в потоці ґрунтових вод використовується рівняння:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (9)$$

де u, v – компоненти вектора швидкості; C – концентрація агресивної речовини; μ_x, μ_y – відомі коефіцієнти дисперсії; n – порозність; t – час.

Для моделювання процесу локальної нейтралізації підземних вод пропонується використання спеціальних проникних бар'єрів, в яких міститься крейда. Якщо агресивною домішкою в ґрунтових водах є азотна кислота, то рівняння реакції має вигляд:



Для побудови чисельної моделі руху агресивної домішки використовується метод розщеплення. Розщеплення здійснюється за фізичними процесами: процес конвективного руху та процес дисперсії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right);$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0.$$

Перше рівняння цієї системи розв'язується за допомогою схеми сумарної апроксимації:

– крок № 1:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right];$$

– крок № 2:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

Друге рівняння цієї системи – рівняння конвективного переносу, що розв'язується за допомогою змінно-трикутної схеми розщеплення.

Розроблена комп'ютерна програма, що реалізує розрахунок руху агресивної домішки в потоці ґрунтових вод.

Результати

Далі наведено результати обчислювального експерименту по визначенню ефективності використання проникного бар'єру на базі моделі планової фільтрації. Математичне моделювання виконано для таких параметрів: розміри розрахункової області 500×420 м; порозність 0,3;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

коефіцієнт фільтрації 20 м/добу; глибина ґрунтових вод на початку розрахункової області 25 м, глибина ґрунтових вод наприкінці розрахункової області 20 м; нестача насичення 1. Розглядається ситуація, коли в підземному потоці є хмара агресивної домішки (кислота HCl), концентрація домішки в хмарі 140 г/л. Початкова хмара забруднювача має складну геометричну форму. Хмара рухається в область, де планується розташування дренажної свердловини.

Математичне моделювання на базі розроблених чисельних моделей виконано для таких сценаріїв:

1. Рух хмари агресивної домішки в потоці ґрунтових вод при відсутності дренажної свердловини (сценарій № 1).

2. Рух хмари домішки в потоці ґрунтових вод при наявності працюючої дренажної свердловини та проникного бар'єру (сценарій № 2).

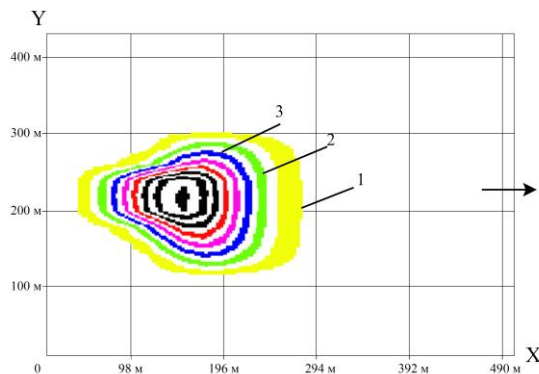


Рис. 1. Ізолінії концентрації домішки в потоці ґрунтових вод, $t = 54$ доби (сценарій № 1):
1 – $C = 12,0$ г/м³; 2 – $C = 27,9$ г/м³; 3 – $C = 43,8$ г/м³

Fig. 1. Contour lines of contaminant concentration in the groundwater flow, $t = 54$ days (scenario No. 1):
1 – $C = 12.0$ g/m³; 2 – $C = 27.9$ g/m³; 3 – $C = 43.8$ g/m³

Як можна бачити з наведеного рисунка при відсутності захисного бар'єру, початкова форма області забруднення повільно змінюється: «хмара» витягується в напрямку руху підземного потоку, розміри плями збільшуються внаслідок процесу дисперсії.

Для сценарію № 2 приймалося, що рівень води в свердловині $h = 15$ м, водотрив – горизонтальний. Відзначимо, що в якості внутрішньої граничної умови, для різницевої комірки, де

розташована дренажної свердловини, ставиться умова для концентрації $C = 0$. Фізично це означає, що домішка «не затримується» всередині комірки, а відкачується зі свердловини.

Результати обчислювального експерименту для сценарію № 2 показано нижче на рис. 2.

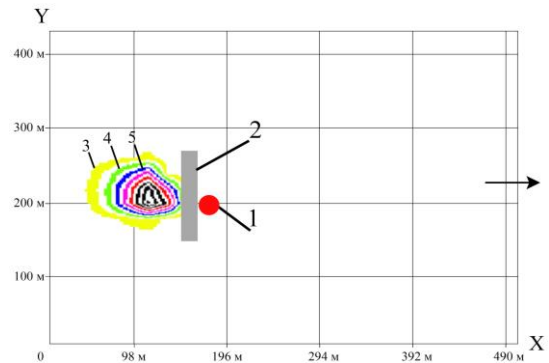


Рис. 2. Ізолінії концентрації домішки в потоці ґрунтових вод, $t = 36$ діб (сценарій № 2):
1 – $C = 12,0$ г/м³; 2 – $C = 27,9$ г/м³; 3 – $C = 43,8$ г/м³

Fig. 2. Contour lines of contaminant concentration in the groundwater flow, $t = 36$ days (scenario No. 2):
1 – $C = 12.0$ g/m³; 2 – $C = 27.9$ g/m³; 3 – $C = 43.8$ g/m³

Як можна бачити з рис. 2, використання проникного бар'єру дає можливість захистити дренажну свердловину від потрапляння агресивної домішки.

Слід відзначити, що час розрахунку кожного сценарію на базі розробленої моделі дорівнює 2 с.

Наукова та практична значимість

Розглянуте рішення комплексної задачі геоміграції – рух агресивної домішки та її нейтралізація у проникному бар'єрі (reactive barrier). Для аналізу ефективності роботи проникного бар'єру розроблено чисельну модель динаміки підземних вод та масопереносу агресивної домішки в ґрунтових водах.

На базі побудованих чисельних моделей розроблено комп'ютерні коди для проведення обчислювальних експериментів.

Розроблені чисельні моделі дають можливість протягом одного робочого дня здійснити серію розрахунків для наукового обґрунтування параметрів проникних бар'єрів.

Висновки

1. Запропоновано чисельну модель динаміки ґрунтових вод, для реалізації якої потрібні звичайні гідрологічні параметри.

2. Розроблено чисельну модель геоміграції, що дає можливість аналізувати ефективність використання проникного бар'єру в ґрунтових водах для зменшення забруднення водоносного шару.

3. Розроблено комп'ютерні програми для проведення обчислювального експерименту на базі розроблених чисельних моделей.

4. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують працездатність розроблених чисельних моделей для рішення складних задач геоміграції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. *Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення*. [Чинний від 2017-01-04]. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2017. 135 с.
2. Acquah T., Appiah-Brempong M., Anornu G. K. Groundwater quality and associated health risks in the Eastern Region of Ghana. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, Iss. 2. Art. e41910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41910>
3. Afful S. K., Boateng C. D., Ahene E., Aryee J. N. A., Wemegah D. D., Gidigasu S. S. R., Britwum A., Osei M. A., Gilbert J., Touré H., Mensah V. A systematic review of neural network applications for groundwater level prediction. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7, Iss. 9. Art. 942. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06817-5>
4. Alawneh A., Shawaqfah M., Nusier O., Odat A.-S. A., Al-Fugara A. Treated Wastewater for Sustainable Groundwater Recharge. *Proceedings of the International Conferences on Digital Technology Driven Engineering 2024*. (21 June 2025). P. 62–73. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-92044-8_7
5. Anda S. T., Fajriani Nurhamidah Putra R. A., Saad R., Rahman M. N. A. Utilizing Self-potential Techniques in Delineating Groundwater Flow. *Proceedings of the Innovative and Sustainable Infrastructure International Convention. Lecture Notes in Civil Engineering*. (03 July 2025). Singapore, 2025. P. 481–490. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-3804-8_43
6. Arya V., Rao M. S. Groundwater Recharge Potential Index and artificial groundwater recharge in the alluvial soils of the middle Ganga Basin. *Discover Applied Sciences*. 2024. Vol. 6, Iss. 7. Art. 367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05851-z>
7. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., Kozachyna V., Brazaluk I., Klym V., Tatarko L. Development of a Method for Assessing Air Dustiness in the Main Fairing of the Launch Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, № 1(119). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013>
8. Brahma S., Yachang O. Study of Groundwater Quality and Its Sustainability Using GIS Techniques in Kokrajhar, Assam, North East India. *Riverine, Estuarine and Marine Hydraulics. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (24 December 2024). Singapore, 2024. P. 553–565. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6009-1_52
9. Wu G., Dong Y., Liu L., Yao Y., Bi Y., Guo J., Gu S. Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. 2023. Vol. 43 : Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII. P. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.3233/atde230795>
10. Narayanamurthi V., Ramasamy, A. Comparison of Three Groundwater Models with Finite Element Methods for Groundwater Head Simulation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. (31 Jan. 2024). Singapore, 2024. P. 469–476. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6229-7_41
11. Tleane S. J., Ochieng G. M. Sources of Groundwater Contamination and Constituent Contaminants: A Review. *The Digital Edge: Transforming Business Systems for Strategic Success*. 2025. Vol. 584 : Studies in Systems, Decision and Control. P. 311–320. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85898-7_28
12. Wang F., Song K., Lan W., Li T., Liu J., Liu D. Identification and assessment of groundwater pollution from landfill leachate based on geophysical, spectroscopy, and hydrogeochemical methods. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 25558. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11189-2>
13. Winston R. B. Getting Started with MODFLOW. *The Groundwater Project*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-030-3>

M. M. BILIAIEV^{1*}, V. V. KOZACHYNA², O.Yu. GUNKO³, V. M. KUZNETSOV⁴,
O. V. ZVONAROVA⁵

^{1*}Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

³Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-9257-763X

⁴Dep. «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

⁵Dep. «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

Mathematical Modeling of the Neutralization Process of An Aggressive Impurity in Groundwater: An Express Model

Purpose. One of the modern means of protecting groundwater in the presence of aggressive impurities is the use of permeable barriers (reactive barrier). When conducting design work, it is important to determine the effectiveness of permeable barriers in advance. To solve such a complex problem, it is necessary to have specialized mathematical models. This paper considers the development of numerical models for calculating the process of neutralizing an aggressive impurity in the groundwater flow using a permeable barrier with regard to the flow hydrodynamics.

Methodology. The hydrodynamics of groundwater is described by a two-dimensional equation (planar model) of filtration of a non-pressure groundwater flow. To model the process of aggressive impurity movement in the groundwater flow, a two-dimensional equation of convective-dispersive spreading of the pollutant in a non-pressure groundwater flow is used. Two finite-difference splitting schemes are used to numerically integrate the groundwater filtration equation. For the numerical integration of the equation of mass transfer of an aggressive impurity, a splitting scheme for physical processes is used. **Finding.** The software implementation of the developed numerical models of groundwater dynamics and mass transfer of aggressive impurities was carried out. The developed computer codes are a tool for operational analysis of the permeable barrier efficiency. **Originality.** The solution to the complex problem of geomigration - the movement of an aggressive impurity and its neutralization in a permeable barrier - is considered. To analyze the efficiency of the permeable barrier, a numerical model of groundwater dynamics and mass transfer of an aggressive impurity in groundwater was developed. On the basis of the developed numerical models, computer codes for computational experiments were developed. The developed numerical models make it possible to carry out a series of calculations within one working day to scientifically substantiate the parameters of the permeable barrier. **Practical value.** The developed numerical models make it possible to quickly solve complex problems in the field of water resources protection from pollution.

Keywords: filtration; geomigration of groundwater pollution; mass transfer; mathematical modeling; permeable barrier

REFERENCES

1. *Nastanova shchodo inzhenerneho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia, 135 DSTU-N B V.1.1-38:2016.* (2017). (in Ukrainian)
2. Acquah, T., Appiah-Brempong, M., & Anornu, G. K. (2025). Groundwater quality and associated health risks in the Eastern Region of Ghana. *Heliyon, 11*(2), e41910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41910> (in English)
3. Afful, S. K., Boateng, C. D., Ahene, E., Aryee, J. N. A., Wemegah, D. D., Gidigas, S. S. R., Britwum, A., Osei, M. A., Gilbert, J., Touré, H., & Mensah, V. (2025). A systematic review of neural network applications for groundwater level prediction. *Discover Applied Sciences, 7*(9), 942. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06817-5> (in English)

4. Alawneh, A., Shawaqfah, M., Nusier, O., Odat, A.-S. A., & Al-Fugara, A. (2025, 21 June). Treated Wastewater for Sustainable Groundwater Recharge. In *Proceedings of the International Conferences on Digital Technology Driven Engineering 2024* (pp. 62-73). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-92044-8_7 (in English)
5. Anda, S. T., Fajriani Nurhamidah Putra, R. A., Saad, R., & Rahman, M. N. A. (2025, 03 July). Utilizing Self-potential Techniques in Delineating Groundwater Flow. In *Proceedings of the Innovative and Sustainable Infrastructure International Convention. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 481-490). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-3804-8_43 (in English)
6. Arya, V., & Rao, M. S. (2024). Groundwater Recharge Potential Index and artificial groundwater recharge in the alluvial soils of the middle Ganga Basin. *Discover Applied Sciences*, 6(7), 367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05851-z> (in English)
7. Biliaiev, M., Biliaieva, V., Rusakova, T., Kozachyna, V., Berlov, O., Semenenko, P., Kozachyna, V., Brazaluk, I., Klym, V., & Tataro, L. (2022). Development of a Method for Assessing Air Dustiness in the Main Fairing of the Launch Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(119)), 17-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013> (in English)
8. Brahma, S., & Yachang, O. (2024, 24 December). Study of Groundwater Quality and Its Sustainability Using GIS Techniques in Kokrajhar, Assam, North East India. In *Riverine, Estuarine and Marine Hydraulics. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 553-565). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6009-1_52 (in English)
9. Wu, G., Dong, Y., Liu, L., Yao, Y., Bi, Y., Guo, J., & Gu, S. (2023). Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. In *Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII* (pp. 766-774). DOI: <https://doi.org/10.3233/atde230795> (in English)
10. Narayanamurthi, V., & Ramasamy, A. (2024, 31 Jan.). Comparison of Three Groundwater Models with Finite Element Methods for Groundwater Head Simulation. In *Recent Advances in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 469-476). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6229-7_41 (in English)
11. Tleane, S. J., & Ochieng, G. M. (2025). Sources of Groundwater Contamination and Constituent Contaminants: A Review. In *The Digital Edge: Transforming Business Systems for Strategic Success. Studies in Systems, Decision and Control* (pp. 311-320). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85898-7_28 (in English)
12. Wang, F., Song, K., Lan, W., Li, T., Liu, J., & Liu, D. (2025). Identification and assessment of groundwater pollution from landfill leachate based on geophysical, spectroscopy, and hydrogeochemical methods. *Scientific Reports*, 15, 25558. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11189-2> (in English)
13. Winston, R. B. (2023). Getting Started with MODFLOW. *The Groundwater Project*. DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-030-3> (in English)

Надійшла до редколегії: 01.08.2025

Прийнята до друку: 16.12.2025

УДК 519.87:631.344.8V. V. BILIAIEVA^{1*}, S. A. SHCHERBYNA²

^{1*}Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMI, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 101 19 78, e-mail vikabelyaeva604@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

²Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMI, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 362 77 89, e-mail s.a.shcherbyna@gmail.com, ORCID 0009-0004-7593-8631

Numerical Models in Applied Problems of Heat and Mass Transfer

Purpose. The problems of farm ventilation, prediction of CO concentration fields inside farms, prediction of artificial soil heating in greenhouses are considered. To solve a complex of such problems, it is necessary to have specialized mathematical models, oriented towards users in design organizations. Development of numerical models for solving heat and mass transfer problems for agricultural facilities (farms, greenhouses). **Methodology.** To solve the problem of ventilation of the working room (determination of the air flow velocity field in the room), a mathematical model of the motion of a vortex-free flow of an inviscid fluid (Laplace equation for the velocity potential) is used. Numerical integration of the modeling equation is carried out using two schemes: a locally one-dimensional scheme and a conditional approximation scheme. The G. Marchuk model is used to model the mass transfer process. Splitting schemes are used for numerical integration of the modeling equation. Two numerical models are built to analyze thermal fields in a stationary environment: a two-dimensional energy equation and a one-dimensional energy equation. Two difference schemes are used for numerical integration of the two-dimensional energy equation: a conditional approximation scheme and an explicit finite-difference scheme. An implicit splitting scheme is used to solve the one-dimensional energy equation. **Findings.** The software implementation of the developed numerical models has been carried out. The results of computational experiments are presented. **Originality.** Effective mathematical models and computer codes have been developed for solving problems of aerodynamics and mass transfer in the working space, as well as the process of heat conduction in a stationary environment. The created numerical models belong to the class of "diagnostic models", that is, computer codes that implement the developed numerical models make it possible to quickly obtain estimated data on thermal or concentration fields in the study area. **Practical value.** The created computer codes can be used to analyze thermal and concentration fields in agricultural premises (greenhouses, farms) to analyze the efficiency of energy systems and ensure the necessary ventilation and heating modes of the environment.

Key words: heat and mass transfer; soil heating; room ventilation; energy saving; mathematical modeling

Introduction

Heat supply of agricultural facilities is a very important task. Heat must provide the necessary air conditions on farms, small enterprises engaged in the processing of agricultural products, in greenhouses. Thanks to economical, resource-saving heating modes, it is possible to reduce the cost of many types of agricultural products. When considering the problems of this class, two classes of tasks can be distinguished - this is the task of ventilation of working premises, in order to remove harmful substances contained in the air of premises, as well as artificial heating of the soil in greenhouses. Ventilation of agricultural premises is a complex task, as it is necessary to take into account a significant number of factors that affect the formation of concentration fields of harmful substances. To ensure the required air quality in work-

ing premises, at the stage of designing the ventilation system, it is necessary to have specialized mathematical models.

For successful plant growth in cultivation facilities, especially during the cold season, it is very important to maintain a stable temperature [2, 6–11]. Insufficient heat supply can lead to a slowdown and reduction in growth.

To scientifically substantiate the parameters of the greenhouse heating system, it is necessary to solve a set of important problems. Particularly important problems include the problem of rational heating of the soil in the greenhouse [11]. This is due to the fact that the root system of plants must be in a certain temperature range. Maintaining this temperature range allows for a positive impact on yield. On the other hand, a rational mode of heating the soil in the greenhouse allows for a reduction in the energy consumption of the enterprise

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

and a reduction in the cost of production. To substantiate the heating mode, it is necessary to have special mathematical models and calculation methods. In this regard, an important scientific problem is the development of methods for calculating the multifactor process of soil heating for choosing an energy-saving heating mode.

Purpose

Development of numerical models for solving heat and mass transfer problems for agricultural facilities (farms, greenhouses).

Methodology

When solving heat and mass transfer problems, it is necessary to determine two possible scenarios:

1. Scenario № 1: heat transfer (mass transfer) process in the absence of medium movement – for example, heating of soil in greenhouses with artificial heating.

2. Scenario № 2: the process of heat transfer (mass transfer) in a moving medium – for example, artificial heating of air in greenhouses.

Therefore, when developing numerical models for the second scenario, it is necessary to add hydroaerodynamic equations to the modeling equations of heat and mass transfer. Let us consider the modeling equations for solving problems of this class. It should be emphasized that hydrodynamic models are the foundation for creating methods for calculating ventilation of agricultural premises.

Hydroaerodynamics model. To describe the motion of an air or liquid medium, it is proposed to use an inviscid fluid model. If the vortex process is neglected, the modeling equation has the form:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

where P – speed potential.

The components of the air flow velocity vector are related to the velocity potential by the following dependencies:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

The boundary conditions for equation (1) are considered in the works of Loytsyansky.

For the numerical solution of the modeling equation (1), the method of establishing the solu-

tion in time is used. To use this method, the equation for the velocity potential is reduced to an «evolutionary» form:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (2)$$

where t – fictitious time.

Next, a locally one-dimensional difference scheme is constructed. For this, the coordinate splitting of the equation (2) is carried out:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Next, a finite-difference scheme is constructed for equations (3) and (4):

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}. \quad (5)$$

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}. \quad (6)$$

As can be seen, for the numerical integration of equations (3) and (4) an explicit difference scheme is used, which enables simple software implementation of the constructed numerical model.

Cyclic calculation based on dependencies (5), (6) ends when the condition is met:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

where ε – small number (for example, $\varepsilon = 0,001$); n – iteration number.

The components of the flow velocity vector are calculated as follows:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

When performing calculations based on the finite-difference scheme (5), (6), it is necessary to use a small-time step, which is associated with the stability of the difference schemes. Therefore, another numerical model was constructed to solve equation (2). The difference equations for the numerical solution of equation (2) are as follows:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

This difference scheme is absolutely stable and allows for simple software implementation.

The considered mathematical models were developed for truss ventilation problems.

Mass transfer model. To solve the problem of mass transfer in a moving medium, the following equation is used (G. Marchuk's model):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (7)$$

where C – impurity concentration in a moving medium; u, v – components of the flow velocity vector; t – time; μ_x, μ_y – diffusion coefficients; $\delta(x_i, y_i)$ – Dirac delta function; Q – intensity of impurity emission into the environment.

The boundary conditions for equation (7) are considered in [3].

The solution of the modeling equation (7) is based on its physical splitting. The splitting is carried out as follows:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (10)$$

The numerical solution of equation (8) is carried out using the alternating triangular finite-difference scheme. The solution of equation (9) is carried out numerically using the method of A.A. Samarsky.

To solve equation (10), the Euler method is used.

This model, together with the developed numerical aerodynamic model, is focused on predict-

ing CO levels on farms (CO emissions from animals).

Heat and mass transfer model. In the absence of medium movement, the process of heat conduction within the medium is modeled by the following equation [1, 5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (11)$$

where T – environment temperature; $a = (a_x, a_y)$ – known thermal conductivity coefficients; x, y – Cartesian coordinates; t – time.

To solve equation (11), the following boundary conditions can most often be set: a «thermally insulated» boundary, a boundary condition of the first kind – a known temperature value at the boundary; a boundary condition of the second kind – a known heat flux at the boundary. For the time $t = 0$, a known temperature distribution in the calculation domain is given.

Two difference schemes are used for numerical integration. The first difference scheme is the explicit scheme [4]:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j}^n}{\Delta x^2} a_x + \Delta t \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} a_y.$$

The second scheme is the conditional approximation scheme. This scheme is two-step and has the form [4]:

$$\frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[a_x \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[a_y \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right],$$

A feature of the conditional approximation scheme is that the unknown temperature value can be found using an explicit formula. Developed computer code.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

In the case where a one-dimensional heat conduction process is considered, the modeling equation has the form [1, 5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (12)$$

where T – soil temperature; a – thermal conductivity coefficient; x – the Cartesian coordinate; t – time.

The boundary conditions for the modeling equation (1) are as follows (Fig. 6):

1. At $x = 0$, the given temperature is $T_s = 20^\circ\text{C}$, which is maintained constant (boundary condition of the first kind).

2. At the end of the calculation area, the condition of a «thermally insulated» wall is implemented.

At the initial moment of time, it is assumed that the temperature in the calculation region is known $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Numerical models. For numerical integration of the modeling equation (1), a total approximation scheme is used. This scheme has the form of a two-step splitting:

– first step:

$$\frac{T_i^{n+\frac{1}{2}} - T_i^n}{\Delta t} = \left[a_x \frac{-T_i^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right];$$

– second step:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[a_x \frac{T_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - T_i^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right].$$

The unknown temperature value inside the soil at each step of the decomposition is determined by an explicit "running" calculation formula.

The software implementation of the developed mathematical model was carried out, and the «SOIL-1» program was developed.

The developed numerical models are focused on predicting temperatures inside greenhouses, in particular, in the soil of greenhouses during its artificial heating. These models can be used to select an energy-saving mode of artificial soil heating in greenhouses.

For numerical integration of the Laplace equation for the velocity potential, an explicit scheme is

used. Equation (2) was reduced to the «non-stationary» form:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (6)$$

where t – fictitious time.

To conduct computational experiments, a software implementation of the constructed numerical model was carried out in the FORTRAN language.

Findings

The figures below show the solution of two model problems. The first problem is the ventilation of a mini-farm, where three animals are located. Fig. 1 shows the air pollution zone (CO concentration field) during ventilation of the farm. The movement of the air flow is shown by «arrows». It can be seen that the developed numerical model makes it possible to determine the regularities of the formation of pollution areas.

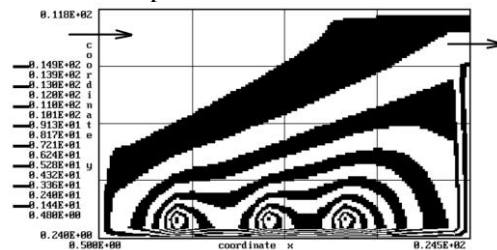


Fig. 1. CO concentration contours centered on mini farms

As can be seen from Fig. 1, pollution areas with a significant gradient of CO concentration are formed near the animals. The pollution areas have the shape of a «circle», which is explained by the fact that where the animals are located, the air flow speed is low, and the formation of the pollution area is greatly influenced by diffusion. The calculation time using the constructed model is 3 s.

Fig. 2 shows the solution to the second model problem – determining the temperature field in the soil (greenhouse) during its artificial heating. Four heating elements are located in the middle of the soil, where a constant temperature of $+35^\circ\text{C}$ is maintained. The positions of these heating elements are shown by a «circle» in Fig. 2. The temperature field formed under the action of these heating elements is shown in Fig. 2.

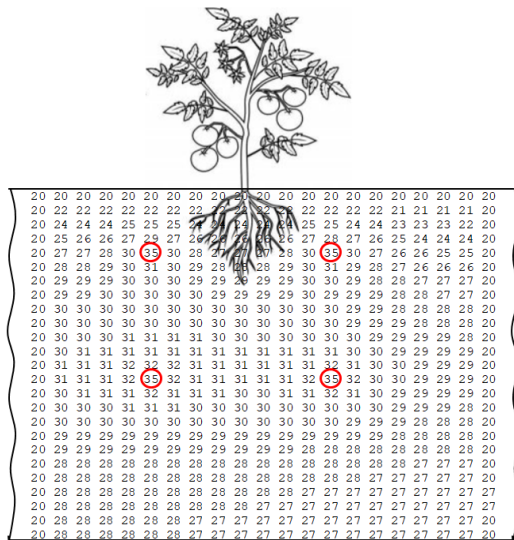


Fig. 2. Temperature field inside the soil during artificial heating

As can be seen from Fig. 2, the use of heating elements allows you to form a temperature field in the area of the root system in the range of 24°C – 26°C .

Note that the calculation time was 3 s.

Originality and practical value

The construction of a complex of numerical models that make it possible to determine the dynamics of heat and mass transfer processes and aerodynamics is considered.

Computer codes have been developed to solve problems of aerodynamics and mass transfer in a working space, as well as the process of heat conduction in a stationary environment.

The created numerical models belong to the class of «diagnostic models», that is, computer codes that implement the developed numerical models make it possible to quickly obtain estimated data related to thermal or concentration fields in the study area.

Conclusions

1. An effective aerodynamic model has been constructed to determine the air flow velocity field in a ventilated room.

2. A numerical mass transfer model has been developed to analyze indoor CO concentration fields.

3. Two numerical models have been developed to analyze the process of artificial soil heating.

4. A computational experiment was conducted, confirming the effectiveness of the developed numerical models.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Якубовская З. Н. *Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 123 с.
2. Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Прокопенко Т. О. Математичне і комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці для створення системи управління. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24, ч. II. С. 174–180.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 367 с.
4. Самарский А. А. *Теория разностных схем* : учебное пособие для ВУЗов. 2-е изд. Москва : Наука, 1983. 616 с.
5. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022*. (Kaunas, 05–07 Oct. 2022). Kaunas, 2022. Pt. I. P. 122–127. URL: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/16592>
6. Dimitropoulou A.-M. N., Maroulis V. Z., Giannini E. N. A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 19. 6788. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788>
7. Faniyi B., Luo Z. A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 6. 2708. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708>

8. Katzin D., Marcelis L. F. M., van Henten E. J., van Mourik S. Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 230. P. 242–276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003>
9. Noakes C. J., Sleigh P. A., Fletcher L. A., Beggs C. B. Use of CFD Modelling to Optimise the Design of Up-per-room UVGI Disinfection Systems for Ventilated Rooms. *Indoor and Built Environment*. 2006. Vol. 15. Iss. 4. P. 347–356. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326x06067353>
10. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy*. 2022. Vol. 325. 119815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119815>
11. Wang J., Lee W. F., Ling P. P. Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, Iss. 2. 653. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653>

В. В. БІЛЯЄВА^{1*}, С. А. ЩЕРБИНА²

^{1*}Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 101 19 78, ел. пошта vikabelyaeva604@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

²Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 362 77 89, ел. пошта s.a.shcherbyna@gmail.com, ORCID 0009-0004-7593-8631

Чисельні моделі в прикладних задачах тепломасопереносу

Мета. Розглянуто задачі вентиляції ферм, прогнозування концентраційних полів СО всередині ферм, прогнозування штучного нагріву ґрунту в теплицях. Для рішення комплексу таких задач потрібно мати спеціалізовані математичні моделі, орієнтоване на користувачів в проектних організаціях. Розробка чисельних моделей для рішення задач тепломасопереносу для об'єктів сільського господарства (ферми, теплиці). **Методика.** Для рішення задачі вентиляції робочого приміщення (визначення поля швидкості повітряного потоку в приміщенні) використовується математична модель руху безвихрового потоку нев'язкої рідини (рівняння Лапласу для потенціалу швидкості). Чисельне інтегрування моделюючого рівняння здійснюється за допомогою двох схем: локально-одновимірної схеми та схеми умовної апроксимації. Для моделювання процесу масопереносу використовується модель Г. Марчука. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння використовуються схеми розщеплення. Для аналізу теплових полів в нерухомому середовищі побудовані дві чисельні моделі: двовимірне рівняння енергії та одновимірне рівняння енергії. Для чисельного інтегрування двовимірного рівняння енергії використовуються дві різницьові схеми: схема умовної апроксимації та явна кінцево-різницева схема. Для рішення одновимірного рівняння енергії використовується неявна схема розщеплення. **Результати.** Здійснена програмна реалізація розроблених чисельних моделей. Наведені результати обчислювальних експериментів. **Наукова новизна.** Розроблені ефективні математичні моделі та комп'ютерні коди для розв'язку задач аеродинаміки та масопереносу в робочому приміщенні, а також процесу теплопровідності в нерухомому середовищі. Створені чисельні моделі відносяться до класу «diagnostic models», тобто, комп'ютерні коди, що реалізують розроблені чисельні моделі, дають можливість оперативно отримати оціночні дані щодо теплових або концентраційних полів в області дослідження. **Практична значимість** Створені комп'ютерні коди можуть бути використані для аналізу теплових та концентраційних полів в сільгосп приміщеннях (теплиці, ферми) для аналізу ефективності роботи енергетичних систем та забезпечення потрібних режимів вентиляції та нагріву середовища.

Ключові слова: тепломасоперенос; нагрівання ґрунту; вентиляція приміщення; енергозбереження; математичне моделювання

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., & Yakubovskaya, Z. M. (2015). *Prognozirovanie urovnya zagryazneniya vozduшной sredy v pomeshcheniyakh*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Vikhrova, L. H., Kalich, V. M., & Prokopenko, T. O. (2011). Matematychni i komp'yuterne modeliuвання rozpodilu temperatur v teploty dlia stvorennia systemy upravlinnia. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrad'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyziatsiia*, 24(2), 174-180. (in Ukrainian)

3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnyih shem: uchebnoe posobie dlya VUZov. (2-e izd.)*. Moskva: Nauka. (in Russian)
5. Biliaiev, M., Rusakova, T., Biliaieva, V., Kozachyna, V., Berlov, O., & Semenenko, P. (2022, Oct.). Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. In *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022 (Pt. I, pp. 122-127)*. Kaunas, Lithuania. Retrieved from <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/16592> (in English)
6. Dimitropoulou, A.-M. N., Maroulis, V. Z., & Giannini, E. N. (2023). A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies, 16*(19), 6788. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788> (in English)
7. Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies, 16*(6), 2708. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708> (in English)
8. Katzin, D., Marcelis, L. F. M., van Henten, E. J., & van Mourik, S. (2023). Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering, 230*, 242-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003> (in English)
9. Noakes, C. J., Sleight, P. A., Fletcher, L. A., & Beggs, C. B. (2006). Use of CFD Modelling to Optimise the Design of Upper-room UVGI Disinfection Systems for Ventilated Rooms. *Indoor and Built Environment, 15*(4), 347-356. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326x06067353> (in English)
10. Sun, W., Wei, X., Zhou, B., Lu, C., & Guo, W. (2022). Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy, 325*, 119815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119815> (in English)
11. Wang, J., Lee, W. F., & Ling, P. P. (2020). Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences, 10*(2), 653. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.07.2025

Прийнята до друку: 05.12.2025

УДК [656.2:355.1]:658.7-049.5

В. В. ГУДІМОВ^{1*}

^{1*}Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Українській державній університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 605 33 76, ел. пошта gudviktor777@gmail.com, ORCID 0000-0002-6630-650X

Актуальні питання заходів безпеки при логістиці залізничним транспортом

Мета. Метою дослідження є проведення змістовного порівняльного аналізу стану виробничого травматизму, пов'язаного зі службовою діяльністю військовослужбовців при здійсненні переміщення військових вантажів залізничним транспортом та обґрунтування запобігання нещасним випадкам, нещасним випадкам з військовослужбовцями зі смертельним наслідком, нещасним випадкам, унаслідок яких військовослужбовцями отримані тяжкі травми. **Методика.** Висвітлено проблемні питання під час навантаження військових ешелонів та транспортів в сучасних умовах. Визначено комплексні заходи, спрямовані на оптимізацію та виконання заходів безпеки під час вантажно-розвантажувальних операцій. На підставі проведеного аналізу надаються пропозиції для організованого навантаження (вивантаження) ешелонів та транспортів з дотриманням заходів безпеки. В дослідженні використано практичний досвід офіцерів служби військових сполучень Командування Сил логістики Збройних Сил України, військових частини, які переміщуються в складі військових ешелонів та відправляють військові вантажі для забезпечення виконання завдань для забезпечення військам усього, що їм є необхідним для життя і проведення операцій під час війни. **Результати.** Організація перевезень військових частин залізничним транспортом в особливий період потребує високого рівня планування, координації дій, дотримання заходів безпеки та взаємодії між військовими й цивільними структурами. Від злагодженості цих дій залежить успішність розгортання військ і виконання завдань оборони держави та забезпечення військових частин всім необхідним для виконання бойових завдань. **Наукова новизна.** Розроблено рекомендації та довідково-аналітичні матеріали для військових частин, органів військового управління, начальників управлінь військових сполучень на залізницях, військових комендантів. Систематизовано роботу командирів (начальників) щодо забезпечення та виконання особовим складом військового ешелону та варті правил надання домедичної допомоги потерпілим, дотримання безпеки під час перебування на коліях залізничних станцій, використання засобів пожежогасіння, а також сигналів, які застосовуються на залізничному транспорті. **Практична значимість.** Результати дослідження можна використовувати при забезпеченні збереження життя та зміцненні здоров'я особового складу військового ешелону та варт під час виконання завдань з охорони і супроводу військових транспортів, які містять небезпечні вантажі (зокрема, боєприпаси) у районах проведення операцій (бойових дій).

Ключові слова: залізничний транспорт; військові перевезення; транспортні засоби; військовий ешелон, військовий вантаж; вантажно-розвантажувальне місце; озброєння, військова техніка (ОВТ); матеріально-технічні засоби; вибухові матеріали; вагон службово-технічний переобладнаний (ВСТП); військово-технічні засоби

Вступ

В особливий період перевезення військових частин залізничним транспортом є одним із основних способів стратегічного і тактичного переміщення військ, озброєння, техніки, матеріальних засобів, а також при евакуації поранених, техніки та запасів.

Головна проблема полягає в ураженні противником місць навантаження (вивантаження) та шляхів пересування військових ешелонів із застосуванням високоточної зброї: ракет, бомб та безпілотних літальних апаратів.

Наразі важливим є питання готовності здійснювати переміщення військових частин (підрозділів) в короткі строки, не порушуючи їх цілісності, із забезпеченням можливості раптового переходу до виконання завдань за призначенням, що є невід'ємною складовою військових операцій (бойових дій) [9].

Виконання перевезень залізничним транспортом в умовах сучасної війни здійснюється у надзвичайно складній обстановці. Дія противника ВТЗ (високо точною зброєю) по шляхам сполучень призводить до руйнування найважливіших транспортних об'єктів.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

сполучень призводить о руйнування найважливіших транспортних об'єктів.

Основними завданнями Укрзалізниці в період воєнних загроз є:

- організація злагодженої роботи залізниці і підприємств з метою задоволення потреб в перевезеннях;

- забезпечення ефективної експлуатації залізничного рухомого складу, його ремонту та оновлення;

- вжиття заходів для забезпечення функціонування залізничного транспорту, його інфраструктури та надійності його роботи в умовах воєнного часу [8].

Організація військових перевезень залізничним транспортом включає в себе заходи, які проводяться штабами оперативних командувань, штабами частин, органами залізничного транспорту з метою створення необхідних умов для перевезення військ і матеріальних засобів в заданих розмірах і встановлені терміни.

Органи військового управління зобов'язані:

- планувати залізничні перевезення заздалегідь, у взаємодії з залізничними адміністраціями;
- визначати обсяги і терміни перевезень;
- забезпечувати охорону, супровід і безпеку військових ешелонів;
- здійснювати контроль за технічним станом вагонів і платформ, призначених для перевезення озброєння та військової техніки.

Мета

Перевезення військових частин залізничним транспортом здійснюється за умови наявності достатнього часу та необхідності перемістити військові частини на відстань, більшу ніж добовий перехід, зберегти моторесурс техніки та пально-мастильні матеріали. Залізничним транспортом можуть перевозитися військові частини (підрозділи) у повному складі або лише важке озброєння та військова техніка, особливо з малим запасом ходу (ресурсу) та низькими маршовими можливостями [1].

Методика

Організація військових перевезень залізничним транспортом складається з наступних етапів:

1. Підготовка до перевезення. Перед відправленням військової частини:

- проводиться завантаження військової техніки, озброєння та матеріальних засобів на станціях навантаження;

- складається план навантаження (план-схема ешелону);

- призначається начальник ешелону, начальник варти, черговий по ешелону.

2. Формування військового ешелону (навантаження). Військовий ешелон формується за принципом:

I. Головна частина – командно-штабні вагони, засоби зв'язку.

II. Основна частина – вагони з особовим складом, бойовою технікою, озброєнням.

III. Тилова частина – вагони з продовольством, паливом, медичним майном, ремонтними засобами.

IV. Охоронна група – розміщується на початку та в кінці складу, має зброю, засоби спостереження, зв'язку і сигналізації.

3. Організація руху та супроводу. Рух військових ешелонів здійснюється за спеціальними графіками в умовах підвищеної таємності.

На кожен ешелон призначається начальник ешелону, який відповідає за дотримання порядку, дисципліни, заходів безпеки, а також за охорону військових вантажів.

4. Охорона і оборона ешелону. Під час руху:

- організовується зовнішня і внутрішня охорона ешелону;

- чергові патрулі стежать за станом платформ і кріпленням техніки;

- на стоянках виставляється варта, визначаються сектори оборони;

- у разі загрози нападу або диверсії ешелон займає оборону за планом начальника ешелону.

5. Безпека руху. Для забезпечення безпеки:

1. Забороняється перевезення людей разом із паливними та вибуховими матеріалами.

2. Здійснюється технічний огляд вагонів перед відправленням.

3. Проводиться інструктаж особового складу з питань пожежної безпеки, евакуації, дій у разі аварії чи нападу.

6. Взаємодія з цивільними органами. Усі перевезення здійснюються у тісній взаємодії з:

- керівництвом залізниць (регіональні управління «Укрзалізниці»);

- місцевими органами влади;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– військовими комендатурами залізничних дільниць та станцій;

– службами охорони, пожежної безпеки та медичного забезпечення.

7. *Завершення перевезення (після прибуття ешелону):*

– проводиться розвантаження техніки і матеріальних засобів за встановленими нормами часу;

– здійснюється перевірка цілісності вантажів;

– проводиться розкредитування перевізних документів;

– складається акт прибуття і приймання військового ешелону.

Складність та багатогранність військової служби вимагає від кожного військовослужбовця твердого знання та точного дотримання заходів безпеки під час перебування на залізничних коліях та поблизу.

Особливості в мирний час. Основний акцент робиться на дотриманні правил пожежної, технічної та транспортної безпеки. Взаємодія з представниками ДСНС, поліції та залізниці у разі аварії чи надзвичайної ситуації має здійснюватися негайно та відповідно до затверджених алгоритмів. Одночасно має бути забезпечений посилений контроль за дисципліною особового складу та попередження розголошення будь-яких відомостей щодо вантажів і маршруту руху.

Особливості у воєнний час [3]:

1. Вживаються додаткові заходи маскування ешелону (світломаскування, димові завіси, розосереджене розташування на станціях).

2. Посилюється охорона, збільшується кількість постів, організуються додаткові дозори. Під час руху через небезпечні райони варта має бути готовою до відбиття нападу диверсійно-розвідувальних груп противника. При загрозі авіаційного чи артилерійського удару здійснюється евакуація особового складу та укриття у визначених місцях.

3. У випадку бойових дій охорона вантажу організовується за принципами бойової охорони (засідки, патрулі, дозори).

4. Додаткові заходи безпеки:

– постійна перевірка технічного стану вагонів і кріплення вантажу;

– наявність засобів пожежогасіння у вагонах з горючими та небезпечними матеріалами. Інструктаж особового складу щодо дій при пожежі, аварії чи нападі;

– забезпечення медичної допомоги та організація чергування медпрацівників під час перевезення.

Заходи безпеки та поведінки особового складу військового ешелону. Особовий склад військового ешелону (військової команди) зобов'язаний дотримуватися військової дисципліни, вимог статутів Збройних Сил України, наказів і розпоряджень командирів і начальників, знати і виконувати правила поведінки та заходи безпеки під час перевезення.

Особовий склад, який слідує в складі військового ешелону (військової команди), повинен знати його номер, військове звання та прізвище начальника військового ешелону (військової команди).

Військовослужбовець, який відстав від військового ешелону (військової команди), зобов'язаний негайно прибути до військового коменданта на транспорті, а там, де його немає, – до начальника станції, доповісти (повідомити) причину відставання, назвати номер військового ешелону (військової команди) і надалі діяти за його наказом.

Особовому складу військового ешелону (військової команди) забороняється:

– втручатися в роботу посадових осіб органів військових сполучень і транспорту;

– затримувати поїзд довше, ніж потрібно для стоянки;

– здійснювати посадку та висадку до подання встановленої команди або сигналу, стрибати у вагони або вистрибувати з них під час руху поїзда;

– зупиняти поїзд стоп-краном, крім випадків виникнення загрози безпеці руху поїзда або життю людей;

– перебувати на дахах вагонів, платформах, гальмівних майданчиках, у кабінах і кузовах машин, баштах танків, а на електрифікованих ділянках залізниці, крім того, торкатися металевих опор і пристроїв заземлення контактної мережі, наближатися до контактного дроту ближче ніж на 2 м;

– сидіти або стояти у дверях вагонів, спиратися на дверні закладки вагонів;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

- застосовувати у вагонах не передбачені правилами види освітлення та опалення;
- заправляти (дозаправляти) паливом техніку після завантаження;
- ходити без потреби залізничними коліями, засмічувати територію й розпалювати багаття в межах станцій;
- самостійно користуватися транспортним майном;
- викидати на стоянках і під час руху будь-які речі з вагонів [7].

Заходи безпеки під час навантаження (розвантаження) залізничного рухомого складу та виконання інших завдань. Вантажно-розвантажувальне місце повинно бути добре освітлене (з урахуванням світломаскування) і вільне від предметів, що перешкоджають навантаженню (розвантаженню). Перед навантаженням рухомий склад очищається від бруду, снігу і льоду, а взимку за необхідності посипається піском [11].

Під час відкривання борту платформи слід стояти так, щоб борт, падаючи, не зачепив особу, що його відкриває.

Під час заїзду (з'їзду) самохідної машини на рухомий склад заборонено будь-кому, крім водія, знаходитись у машині.

Керівник навантаження (командир підрозділу, розрахунку, екіпажу, старший машини) повинен знаходитись у такому місці, звідки він може бачити положення коліс або гусениць машини під час руху і щоб його сигнали було добре видно водію, як правило, на наступній платформі. Уночі для допомоги керівнику навантаження призначається спостерігач, який повинен стежити за положенням коліс або гусениць під час поворотів машин у ході навантаження, а, за необхідності, сигналізувати керівнику навантаження про зупинку машин.

Керівник навантаження повинен стежити, щоб стволи гармат, стріли кранів та інші виступаючі частини озброєння та військової техніки під час поворотів на залізничному рухомому складі не порушували безпеку руху по суміжних коліях.

Водій зобов'язаний:

- заводити двигун, починати рух та виходити з кабіни машини тільки за сигналом керівника навантаження;

- обирати правильний напрямок руху (у разі навантаження з бокового навантажувально-розвантажувального пристрою заїзд на рухомий склад здійснюється під кутом близько 30° до осі колії), щоб запобігти зайвим поворотам під час заїзду;

- рухатися по навантажувально-розвантажувальному пристрою і залізничних платформах на першій передачі (на автомобілі з двома ведучими мостами – з включеним переднім мостом і демультіплікатором);

- рухатися плавно, не здійснюючи різких рухів і поворотів (на збірно-розбірних платформах і апарелях повороти гусеничних машин не допускаються);

- уважно слідкувати за сигналами керівника навантаження і бути готовим негайно зупинити машину;

- у момент переходу коліс або гусениць із вантажно-розвантажувального пристрою на залізничну платформу зменшити подачу палива, намагаючись зберегти плавність руху;

- поворот гусеничної машини на залізничній платформі починати тільки після того, як перший опорний каток внутрішньої гусениці опиниться на підлозі залізничної платформи, не допускаючи при цьому виходу осі першого катка гусениці, що забігає за межі підлоги залізничної платформи;

- для вирівнювання гусеничної машини щодо повздовжньої осі залізничної платформи використовувати рух вздовж рухомого складу або намагатися зробити це за рахунок декількох послідовних поворотів на невеликі кути під час руху (вперед і назад) в межах однієї залізничної платформи.

Під час навантаження краном підйом вантажу і рух крана повинні здійснюватися тільки після подачі відповідних сигналів.

Під час переміщення на станціях слід остерігатися локомотивів і вагонів, які рухаються по коліях. Необхідно бути особливо уважним під час виходу на колію з-за вагонів чи будівель, у разі наближення потягу – відходити на безпечну відстань.

Обходити поїзд з локомотивом, що стоїть, або групу вагонів потрібно на відстані не менш 3 м. Не можна проходити між розчепленими вагонами, якщо відстань між ними менше 5 м.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Особовому складу військового ешелону забороняється:

- прокладати перехідні містки під озброєнням та технікою, що рухаються, і знаходиться між розташованою на платформі машиною та іншою, що наближається до неї, ближче ніж за 5 м;

- знаходитися на відстані менше ніж 3 м від залізничної платформи з протилежного боку бокового вантажно-розвантажувального пристрою, з якого заїжджає машина, а під час навантаження з торцевого вантажно-розвантажувального пристрою і під час руху машин вздовж рухомого складу – поруч із вантажно-розвантажувальним пристроєм і залізничними платформами, по яких рухаються машини;

- знаходитися під вантажем та стрілами працюючих кранів;

- закріплювати (розкріплювати) озброєння та військову техніку на рухомому складі під час руху поїзда та маневрів;

- зливати воду із системи охолодження машин взимку на підлогу; перебігати колії перед локомотивами і вагонами, які рухаються;

- підлізати під вагони і перелізати через автозчеплення вагонів; сидіти на колії і на краю вантажно-розвантажувальних і пасажирських платформ.

Чатовим і спостерігачам забороняється:

- під час руху потяга відходити від загороження, сидіти на бортах платформ, на краю і на сходах гальмівних майданчиків;

- під час маневрів на станціях знаходитися на підніжках, призначених для складачів поїздів, на рамі і брусах платформ, тримаючись за борт;

- на стоянках ходити по сусідній колії.

На електрифікованих ділянках залізниці забороняється:

- ставати на башти танків, знаходитися на дахах кабін і кунгів спеціальних автомобілів, навантажених на платформи, і на дахах вагонів;

- розкручувати мотки дроту поблизу машин, що закріплюються на рухомому складі, та висувувати антени пристроїв, якщо кінці їх при цьому можуть наблизитися до контактного дроту ближче ніж на 2 м;

- торкатися металевих опор, пристроїв для заземлення, обірваних проводів контактної мережі і наближатися до них ближче ніж на 2 м.

З метою запобігання нещасним випадкам командир військової частини, від якої відряджається варта, організовує з особовим складом варти заняття з правил надання потерпілим першої медичної допомоги, безпеки під час перебування на коліях залізничних станцій, використання засобів пожежогасіння, а також сигналів, які застосовуються на залізничному та водному транспорті [10].

Рух змін на пости та з постів здійснюється на міжколійі або узбіччі земельного полотна колоною по одному. Перехід залізничної колії зміною, яка прямує на пости та з постів, здійснюється швидко й тільки під прямим кутом. Слід попередньо подивитись праворуч та ліворуч, переконатись у відсутності небезпеки.

Організація безпеки під час перевезень військових залізничним транспортом є одним із найважливіших напрямів діяльності командирів (начальників). Вона спрямована на забезпечення збереження життя і здоров'я особового складу, вантажів, військової техніки та запобігання надзвичайним ситуаціям.

Начальник військового ешелону несе особисту відповідальність за дотримання правил безпеки, пожежної безпеки та надання першої медичної допомоги підлеглим.

Начальник військового ешелону зобов'язаний:

- провести інструктаж особового складу щодо правил поведінки на коліях та поблизу залізничних шляхів;

- порядку посадки та висадки;

- дій у разі виникнення пожежі або нещасного випадку;

- надання першої медичної допомоги;

- перевірити наявність та справність засобів пожежогасіння, аптечок, вогнегасників, нош;

- призначити відповідальних осіб за медичне забезпечення, за пожежну безпеку, за контроль безпеки під час руху ешелону;

- організувати чергування та спостереження під час стоянок на станціях.

Надання першої медичної допомоги. Командир (начальник) забезпечує:

- наявність у кожному вагоні аптечки першої допомоги;

- інструктаж особового складу щодо дій при травмах, опіках, кровотечах, ураженнях електричним струмом;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– навчання військовослужбовців користуванню перев'язувальними матеріалами, джгутами, антисептиками;

– порядок евакуації потерпілих до медичних пунктів або найближчих лікувальних установ.

Використання засобів пожежогашіння. Командир (начальник) забезпечує:

– перевірку наявності та придатності вогнегасників у кожному вагоні;

– інструктаж про порядок їх використання;

– визначення місць зберігання легкозаймистих матеріалів;

– заборону куріння та використання відкритого вогню;

– підготовку особового складу до дій при виникненні пожежі (гасіння осередку, евакуація людей, від'єднання небезпечних вагонів).

Контроль і відповідальність. Командир ешелону несе персональну відповідальність за організацію безпеки, збереження життя людей та військового майна.

Щодня під час руху і стоянок проводиться перевірка стану технічних засобів, аптечок, вогнегасників та інструктаж чергових осіб.

Про всі випадки травмування чи пожежі командир зобов'язаний негайно повідомити старшого начальника, військового коменданта на шляху проходження та залізничну адміністрацію [5].

Результати

На основі проведеного дослідження, виходячи з вимог керівних документів та їх фактичного виконання, слід відмітити, що роботи органів військового управління, командування частин, управлінь військових сполучень на залізницях, військових комендатур щодо виконання заходів безпеки недостатньо.

На прикладі Дніпропетровської області було проведено аналіз нещасних випадків, які сталися за визначений період під час навантаження (вивантаження) військових частин та підрозділів, а також на маршрутах їхнього переміщення.

Ілюстративна діаграма причин нещасних випадків (рис. 1) показує розподіл типових причин нещасних випадків під час навантаження/вивантаження та переміщення залізницею.



Рис. 1. Ілюстративна діаграма причин нещасних випадків

Fig. 1. Illustrative diagram of the causes of accidents

Наукова новизна та практична значимість

Типові причини нещасних випадків під час навантаження/вивантаження і руху залізницею:

1. Людський фактор (недотримання інструкцій, помилки при кріпленні, неправильні дії під час маневрування).

2. Несправне або невідповідне кріпильне оснащення та інвентар (втрата стійкості вантажу, зриви кріплення).

3. Порушення технології розміщення та кріплення ОВТ/МТЗ (невідповідне розташування, неврахування центра ваги).

4. Недостатній інструктаж, підготовка й контроль персоналу (відсутність відпрацювання операцій, відсутність відповідального контролю).

5. Погодні умови та зовнішні фактори (слизька платформа, обледеніння, зниження огляду).

6. Інфраструктурні проблеми (незадовільний стан рамп, колій, освітлення) [2].

Ключові вразливі місця згідно дослідження:

– найбільш критичні операції, фіксація/кріплення техніки на платформах, перехід між платформами під час маневрів, робота біля габариту рухомого складу;

– відповідальність як на рівні ланки (начальники підрозділів), так і на рівні залізничної служби – чітке розмежування обов'язків є обов'язковим [4].

Заходи запобігання (практичні рекомендації). Організаційні:

1. Впровадження обов'язкової процедури «Передопераційна перевірка безпеки» перед кожною операцією навантаження/вивантаження: огляд інвентарю, кріплень, моніторинг погодних умов, розподіл обов'язків (включити накази, інструкції).

2. Призначення відповідальної особи за безпеку вантажно-розвантажувальних робіт від військової частини та від залізниці; при загрозі – зупинка операції до усунення ризику.

3. Протоколи співпраці з Укрзалізницею, операторами щодо маневрування, блокування та безпечних коридорів руху.

Технічні:

1. Стандартизація кріпильних засобів, регулярна перевірка та обслуговування (періодичні інспекції).

2. Використання сертифікованої тарної продукції та спеціальних піддонів, фіксаторів для ОВТ, МТЗ.

Навчання і тренування:

1. Регулярні тренування з відпрацювання операцій навантаження, кріплення в реальних умовах (включно з нічними, погодними сценаріями).

2. Інструктаж перед кожною операцією і документальний запис про проходження інструктажу.

Контроль і моніторинг:

1. Ведення журналу інцидентів і небезпечних подій з аналізом причин та впровадженням коригувальних заходів [4].

2. Періодичні аудити безпеки вантажно-розвантажувальних робіт.

Рекомендації з оперативного реагування при нещасному випадку. Миттєва зупинка операції, надання першої допомоги, евакуація постраждалого, забезпечення безпеки місця події, повідомлення відповідних служб (медична, військова, залізнична) [4].

Проведення розслідування та внесення змін до процедур.

Висновок

Дотримання зазначених вимог вбереже особовий склад ешелону та варти від фатальних випадків при навантаженні, вивантаженні та просуванні по залізниці в складі ешелону або в складі варти при супроводі військових вантажів, а також загалом при перебуванні на залізниці або поблизу неї. Зниження кількості тяжких нещасних випадків і загиблих можливо за умови: чіткої технології робіт, відповідальності посадових осіб, регулярної перевірки кріплень та інвентарю, навчання особового складу і належної співпраці з залізницею.

Наведені заходи та контрольні процедури – практична дорожня карта для військових частин, які виконують вантажно-розвантажувальні роботи та перевезення техніки залізницею.

Своєчасна організація роботи командирів і начальників варти, постійний контроль за виконанням вимог безпеки, навчання особового складу правилам надання допомоги і використання засобів пожежогасіння – запорука збереження життя, здоров'я військовослужбовців та успішного виконання завдань військового ешелону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*. Матеріали 19 наук.-практ. міжнар. конф. (Харків, 1-2 черв. 2023 р.). Мін-во освіти і науки України ; Укр. держ. ун-т залізн. трансп. Харків : УкрДУЗТ, 2023. 466 с.
URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/17959>
2. *Науково-технічні дослідження у галузі транспорту* : колективна монографія / за заг. ред. Д. В. Ломотька ; Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М., 2022. 216 с.
URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/transport1.pdf>
3. *Про введення воєнного стану в Україні* : Указ Президента України від 24.02.2022 № 64/2022 : станом на 31 жовт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/64/2022#Text>
4. *Про затвердження Інструкції про розслідування та облік нещасних випадків з військовослужбовцями, професійних захворювань і аварій у Збройних Силах України* : Наказ М-ва оборони України від 27.10.2021 № з1667-21. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1667-21#Text>
5. *Про затвердження Порядку розміщення та кріплення військових вантажів на рухомому складі, у тому числі відкритому* : Наказ М-ва оборони України та М-ва розвитку громад та територій України від 19.03.2025 № з0584-25. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0584-25#Text>
6. *Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію (із змінами і доповненнями)* : Закон України від 21.10.1993 № 3543-ХІІ : станом на 01 січ. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3543-12/ed20250101#Text>
7. *Про статут внутрішньої служби Збройних сил України (із змінами і доповненнями)* : Закон України від 24.03.1999 № 548-ХІV : станом на 01 жовт. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-14/ed20201001#Text>
8. *Про транспорт (із змінами і доповненнями)* : Закон України від 10.11.1994 № 232/94-ВР : станом на 28 трав. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр#Text>
9. *Про функціонування єдиної транспортної системи України в особливий період (із змінами і доповненнями)* : Закон України від 20.10.1998 № 194-ХІV : станом на 23 квіт. 2021 р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/194-14#Text A>
10. *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation* / ed. by A. Śladkowski. Cham : Springer International Publishing, 2022. 559 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8>
11. Potter A., Soroka A., Naim M. Regional resilience for rail freight transport. *Journal of Transport Geography*. 2022. Vol. 104. 103448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103448>

V. V. GUDIMOV^{1*}

^{1*}Dep. of Military Training of Specialists of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 605 33 76, e-mail gudvictor777@gmail.com, ORCID 0000-0002-6630-650X

Current Issues of Safety Measures in Railway Transport Logistics

Purpose. The purpose of the study is to conduct a substantive comparative analysis of the state of occupational injuries related to the official activities of military personnel during the transportation of military cargo by rail and to justify the prevention of accidents, fatal accidents involving military personnel, and accidents resulting in serious injuries to military personnel. **Methodology.** Problematic issues during the loading of military trains and transports in modern conditions are highlighted. Comprehensive measures aimed at optimizing and implementing safety measures during loading and unloading operations are identified. Based on the analysis, proposals are made for the organized loading (unloading) of trains and transport in compliance with safety measures. The study uses the practical experience of officers of the military transport service of the Logistics Command of the Armed Forces of Ukraine. Military units that are transported as part of military echelons and send military cargo to ensure the fulfillment of tasks to provide troops with everything they need for life and operations during wartime. **Findings.** During a special period, the transportation of military units by rail is one of the main methods of strategic and tactical movement of troops, weapons, equipment, and material resources, as well as the evacuation of the wounded, equipment, and supplies. **Originality.** Development of recommendations and reference and analytical material for military units, military command bodies, heads of military transport departments on railways, and military commandants. Systematization of the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

work of commanders (chiefs) to ensure and enforce the rules for providing first aid to victims, safety while on the tracks of railway stations, the use of fire extinguishing equipment, as well as signals used in railway transport by military echelon personnel and guards. **Practical value.** Ensuring the preservation of life and strengthening the health of military echelon personnel and guards during the protection and escort of military transports with dangerous cargo (ammunition) in areas of operations (combat actions).

Keywords: railway transport; military transport; vehicles; military echelon, military cargo; loading and unloading site; armament, military equipment; material and technical resources; explosive materials; converted service and technical railcars; military technical resources

REFERENCES

1. *Mizhnarodna transportna infrastruktura, industrialni tsenyry ta korporatyvna lohistyka* (2023, June). Materialy 19 naukovo-praktychnoi mizhnarodnoi konferentsii (466 p.), Ukrainian State University of Railway Transport. Kharkiv, Ukraine. Retrieved from <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/17959> (in Ukrainian)
2. Lomotko, D. V. (Ed.). (2022). *Naukovo-tekhnichni doslidzhennia u haluzi transportu : kolektyvna monohrafiia*. Ivano-Frankivsk : Vydavets Kushnir H. M. Retrieved from <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/transport1.pdf> (in Ukrainian)
3. Ukaz Prezidenta Ukrainy. (2022). *Pro vvedennia voiennoho stanu v Ukraini*. № 64/2022. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/64/2022#Text> (in Ukrainian)
4. Nakaz Ministerstva oborony Ukrainy. (2021). *Pro zatverdzhennia Instruktii pro rozsliduvannia ta oblik neshchasnykh vypadkiv z viiskovosluzhbovtsiamy, profesiinykh zakhvoriuvan i avarii u Zbroinykh Sylakh Ukrainy*. № z1667-21. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1667-21#Text> (in Ukrainian)
5. Nakaz Ministerstvava oborony Ukrainy ta Ministerstvava rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. (2025). *Pro zatverdzhennia Poriadku rozmishchennia ta kriplennia viiskovykh vantazhiv na rukhomomu skladi, u tomu chysli vidkrytomu*. № z0584-25. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0584-25#Text> (in Ukrainian)
6. Zakon Ukrainy. (2025). *Pro mobilizatsiinu pidhotovku ta mobilizatsiiu (iz zminamy i dopovnenniamy)*. № 3543-XII. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3543-12/ed20250101#Text> (in Ukrainian)
7. Zakon Ukrainy. (2020). *Pro statut vnutrishnoi sluzhby Zbroinykh syl Ukrainy (iz zminamy i dopovnenniamy)*. № 548-XIV. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-14/ed20201001#Text> (in Ukrainian)
8. Zakon Ukrainy. (2024). *Pro transport (iz zminamy i dopovnenniamy)*. № 232/94-VR. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр#Text> (in Ukrainian)
9. Zakon Ukrainy. (2021). *Pro funktsionuvannia yedynoi transportnoi systemy Ukrainy v osoblyvyi period (iz zminamy i dopovnenniamy)*. № 194-XIV. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/194-14#Text> (in Ukrainian)
10. Śładkowski, A. (Eds.). (2022). *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation*. Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8> (in English)
11. Potter, A., Soroka, A., & Naim, M. (2022). Regional resilience for rail freight transport. *Journal of Transport Geography*, 104, 103448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103448> (in English)

Надійшла до редколегії: 18.08.2025

Прийнята до друку: 25.12.2025

УДК 519.87:[504.6:622.235]

О. О. МЕДВЕДЄВА¹, В. В. БІЛЯЄВА², П. С. КІРІЧЕНКО³, В. А. КОЗАЧИНА^{4*},
А. Ю. УСЕНКО⁵

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (098) 506 98 00, ел. пошта medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

²Каф. «Природничо-наукових та загально інженерних дисциплін», ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, Запоріжжя, Україна, 69008, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

³Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{4*}Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Каф. «Енергетичних систем та енергоменеджменту», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта usenko.pte@ukr.net, ORCID 0000-0001-7467-6220

Математичне моделювання забруднення повітря після вибуху в кар'єрі: експрес прогноз

Мета. Розробка CFD моделі, що дає можливість оперативно прогнозувати рівень пилового забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі, розробка швидкої розрахункової моделі CFD. **Методика.** Для рішення задачі аеродинаміки та масопереносу використовуються фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища. Поле швидкості повітряного потоку моделюється за допомогою рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. Чисельне інтегрування рівняння Лапласу здійснюється за допомогою метода розщеплення. Після розщеплення будуються різницеві рівняння, що можуть бути вирішені за явною формулою. Для моделювання розповсюдження пилу в атмосферному повітрі використовується модель Г. Марчука. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу використовуються різницеві схеми розщеплення. На першому етапі здійснюється фізичне розщеплення на рівняння дифузії та конвективного переносу пилу. Далі будуються змінно-трикутні різницеві схеми розщеплення. Рельєф місцевості моделюється на прямокутній різницевій сітці за допомогою маркерів. **Результати.** Розроблений комплекс чисельних моделей для рішення задач: аеродинаміки та масопереносу вагомої домішки в атмосферному повітрі. Для побудови чисельних моделей використані кінцево-різницеві схеми розщеплення, що дозволяють отримати прості розрахункові залежності. Побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно розраховувати динаміку пилового забруднення в умовах складного рельєфу місцевості. **Наукова новизна.** Побудовані чисельні моделі для аналізу динаміки пилового забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі. Модель дає можливість враховувати геометричну форму рельєфу, метеоумови, швидкість гравітаційного осадження пилу, атмосферну дифузію, форму пилової хмари після вибуху. Модель може бути використана для експрес оцінювання впливу вибухів на навколишнє середовище. **Практична значимість.** Розроблений спеціалізований пакет комп'ютерних програм для проведення обчислювального експерименту на базі побудованих чисельних моделей. Наведено результати чисельного експерименту.

Ключові слова: забруднення повітря; пилова хмара; кар'єр; CFD моделювання; масоперенос

Вступ

Вибухи в кар'єрах призводять до інтенсивного забруднення атмосферного повітря (рис. 1). Тому, прогнозування динаміки забруднення атмосферного повітря після вибухів в кар'єрах має важливе з точки зору захисту довкілля, охорони праці. Для такого прогнозу важно мати спеціалізовані математичні моделі.

З точки зору моделювання, розрахунок поширення пилу після вибуху в кар'єрі – це задача нестационарного масопереносу. Для рішення задач даного класу широко використовуються аналітичні моделі [6–14] та CFD моделі [1–3]. Аналітичні моделі потребують незначної кількості початкових даних та дають можливість аналізувати динаміки забруднення атмосферного повітря, але без урахування впливу рельєфу

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

на цей процес. CFD моделі дають можливість отримати детальну інформацію про формування областей пилового забруднення, але потрібна значна кількість науково-обґрунтованої інформації в якості початкових даних. Реалізація математичних моделей даного класу потребує дуже потужних комп'ютерів та значного часу на проведення розрахунку. На етапі науково-дослідницьких робіт, що пов'язані з оцінюванням впливу вибухів на забруднення навколишнього середовища це є досить незручним. В багатьох випадках, при проведенні наукових досліджень, потрібно робити значну кількість розрахунків (наприклад, визначення областей забруднення при різних метеоумовах, різній потужності вибуху тощо). Тому, для практики, важливо мати математичні моделі, що враховують такі важливі фактори, як рельєф, метеоумови тощо, а з іншого боку, потребують мало часу при реалізації на комп'ютері.

Загальновідомо, що забруднення від транспортних засобів на міських вулицях є дуже інтенсивним і може завдати шкоди людині. Для зменшення інтенсивності забруднення повітря від дорожнього руху пропонуються різні заходи пом'якшення.



Рис. 1. Пилогазова хмара в кар'єрі
[https://doi.org/10.15421/2018_277]

Fig. 1. Dust cloud in the quarry
[https://doi.org/10.15421/2018_277]

Мета

Метою даної роботи є розробка швидко розрахункової CFD моделі для аналізу забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі. Створення пакету прикладних програм для рішення задач нестационарного розповсюдження пилу в атмосфері в умовах складного рельєфу місцевості.

Методика

Після вибуху в кар'єрі формується пилогазова хмара, що починає рухатися в напрямку вітру. Особливістю даного процесу є те, що рух хмари відбувається в умовах складного рельєфу місцевості. Це значно ускладнює розробку математичних моделей для оцінювання впливу вибухів в кар'єрах на забруднення навколишнього середовища. Для отримання науково обґрунтованої інформації потрібно, щоб математична модель враховувала не тільки метеоумови, но також рельєф місцевості [4]. Тому, першим, важливим етапом моделювання є розробка математичної моделі для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в умовах складного рельєфу місцевості [4].

В даній роботі для рішення цієї задачі використовується рівняння Лапласа для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Якщо поле потенціалу швидкості розраховано, то компоненти вектору швидкості повітряного потоку визначаються так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Для рівняння (1) ставляться граничні умови, що наведені в роботі [4].

Рішення рівняння (1) знаходиться чисельним шляхом. Для цього використовуються дві різницеві схеми. Для побудови чисельної моделі використовується метод розщеплення для «нестационарного» рівняння, що має наступний вигляд:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (2)$$

тут t – фіктивний час.

Далі, при побудові першої схеми реалізується таке розщеплення рівняння (2):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Невідоме значення потенціалу швидкості P визначається на базі рівняння (3) так [5]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

Невідоме значення потенціалу швидкості P визначається на базі рівняння (4) так:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Так як розрахунок здійснюється за «фіктивним» часом, то для його зупинки потрібно щоб була виконана умова:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Друга різницєва схема для чисельного рішення задачі аеродинаміки має вигляд [5]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (5)$$

Як можна бачити з (5) рішення задачі по визначенню потенціалу швидкості розщеплюється на два кроки. На кожному кроці потенціал швидкості визначається методом «рахунку, що біжить».

Значення компонент швидкості розраховується на бічних сторонах контрольного об'єму наступним чином [5]:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для визначення концентрації пилу в атмосферному повітрі при русі пилової хмари використовується рівняння Г. Марчука (профільна задача) [4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (6)$$

де C – концентрація пилу в атмосферному повітрі; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти атмосферної дифузії; w_s – швидкість гравітаційного осадження пилу t це час.

Початкові та граничні умови для рівняння (4) описані в [1, 3, 5]. На місце вибуху в кар'єрі задається форма пилогазової хмари та концентрація пилу в хмарі.

Для чисельного рішення рівняння Г. Марчука здійснюється його фізичне розщеплення так [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right).$$

Далі здійснюється така трансформація похідних:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y};$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2};$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

На наступному кроці записується змінно-трикутна схема розщеплення:

– перший крок:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0;$$

– другий крок :

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0.$$

Дана схема дозволяє визначати концентрацію пилу на кожному кроці за явною схемою.

Чисельне інтегрування рівняння дифузії використовується кінцево-різницева схема сумарної апроксимації. Схема розщеплення має вигляд:

– перший крок:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right];$$

– другий крок:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Особливістю даної різницевої схеми є те, що визначення концентрації пилу також здійснюється за явною формулою.

Рельєф місцевості моделюється на прямокутній різницевій сітці за допомогою маркерів.

Здійснено кодування розроблених чисельних моделей, мова програмування – FORTRAN. Розроблений комплекс комп'ютерних програм включає в себе підпрограми типу SUBROUTINE:

1. DK1 – розрахунок потенціалу швидкості на базі першої чисельної моделі.

2. DK2 – розрахунок потенціалу швидкості на базі другої чисельної моделі

3. DK3 – реалізація граничних умов в областях складної геометричної форми.

4. DKK – розрахунок поля швидкості повітряного потоку.

5. DE1 – розрахунок концентрації пилу на першому кроці розщеплення (рівняння переносу).

6. DE2 – розрахунок концентрації пилу на другому кроці розщеплення (рівняння переносу).

7. DE3 – розрахунок концентрації пилу на першому кроці розщеплення (рівняння дифузії).

8. DE4 – розрахунок концентрації пилу на першому кроці розщеплення (рівняння дифузії).

9. DPP – друк результатів обчислювального експерименту.

10. VDF – файл початкових даних.

Результати

Розроблені чисельні моделі аеродинаміки та масопереносу були використані для рішення модельної задачі. Розглядався процес руху пилової хмари після вибуху в кар'єрі в умовах складного рельєфу. Мета розрахунку – аналіз стійкості побудованих чисельних моделей при рішенні задач масопереносу в областях складної геометричної форми.

Схема розрахункової області показана на рис.2. Як можна бачити з рис. 2 в розрахунковій області розташовані дві впадини. Перша впадина – кар'єр, де формується пилогазова хмара. На дні другої впадини розташована акваторія річки. Швидкість вітру 8 м/с; швидкість гравітаційного осадження пилу 0,0002 м/с. Коефіцієнти атмосферної дифузії розраховуються так:

$$\mu_x = 0,1u(x, y), \quad \mu_y = 0,1v(x, y).$$

Тобто, коефіцієнти атмосферної дифузії залежать від координат та локальної швидкості повітряного потоку.

Динаміка формування області забруднення показана на рис. 3–5.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

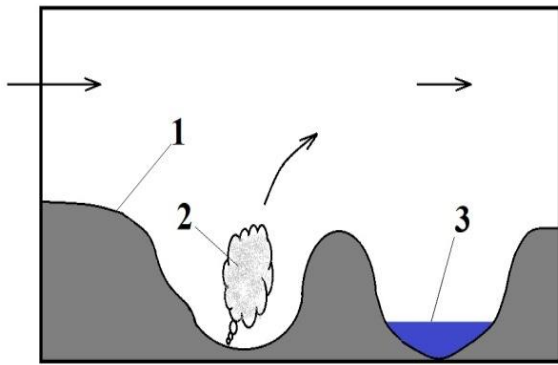


Рис. 2. Схема розрахункової області:
1 – рельєф; 2 – пилогазова хмара; 3 – річка

Fig. 2. Scheme of the calculation area:
1 – relief; 2 – dust cloud; 3 – river

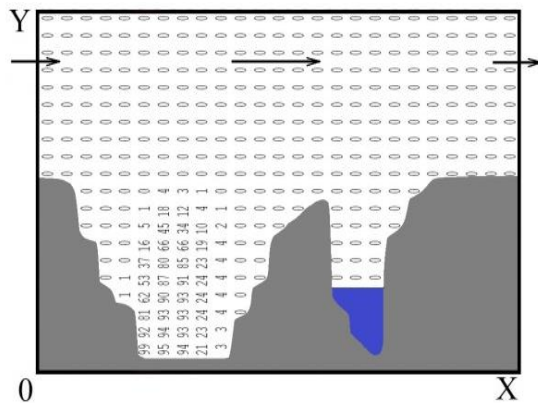


Рис. 3. Концентрація г/м³ пилу в області дослідження, $t = 0,1$

Fig. 3. Concentration g/m³ of dust in the study area, $t = 0.1$

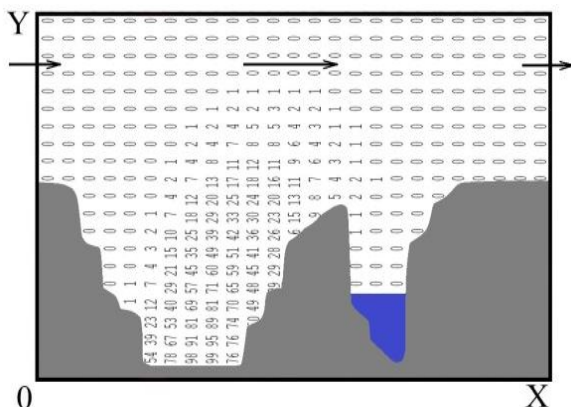


Рис. 4. Концентрація г/м³ пилу в області дослідження, $t = 0,2$

Fig. 4. Concentration g/m³ of dust in the study area, $t = 0.2$

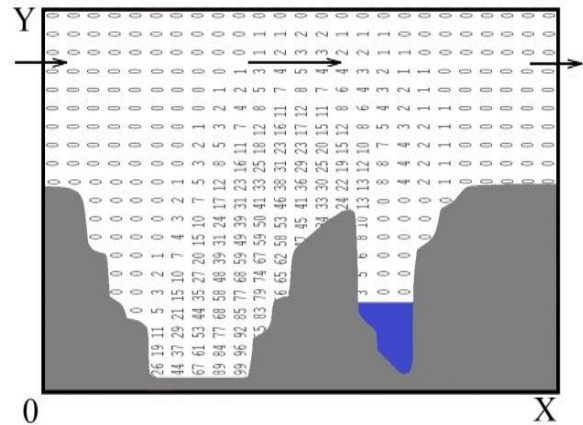


Рис. 5. Концентрація г/м³ пилу в області дослідження, $t = 0,3$

Fig. 5. Concentration g/m³ of dust in the study area, $t = 0.3$

Як можна бачити з наведених рисунків, область забруднення, після вибуху, збільшується в розмірах. Так як розглядалося моделювання легковагової домішки, то можна бачити, що пил, внаслідок атмосферної дифузії, виходить з кар'єру.

Проведений обчислювальний експеримент підтвердив стійкість та працездатність розроблених чисельних моделей для аналізу областей забруднення в умовах складного рельєфу.

Час розрахунку 2 с.

Наукова новизна та практична значимість

Побудовані чисельні моделі для аналізу динаміки пилового забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі. Модель дає можливість враховувати геометричну форму рельєфу, метеоумови, швидкість гравітаційного осадження пилу, атмосферну дифузію, форму пилової хмари після вибуху.

Модель може бути використана для експрес оцінювання впливу вибухів на навколишнє середовище.

Висновки

Розроблений комплекс чисельних моделей для рішення наступних задач:

- аеродинаміки повітряного потоку;
- масопереносу вагової домішки в атмосферному повітрі.

Для побудови чисельних моделей використані кінцево-різницеві схеми розщеплення, що дозволяють отримати прості розрахункові залежності.

Побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно розраховувати динаміку пи-

лового забруднення в умовах складного рельєфу місцевості.

Подальший розвиток досліджень буде здійснюватися в напрямку створення 3D CFD моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. *Технології захисту навколишнього середовища: захист повітряного середовища* : монографія. Запоріжжя : СТАТУС, 2025. 244 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
4. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
5. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Agibayeva A., Khalikhan R., Guney M., Karaca F., Torezhan A., Avcu E. An Air Quality Modeling and Disability-Adjusted Life Years (DALY) Risk Assessment Case Study: Comparing Statistical and Machine Learning Approaches for PM2.5 Forecasting. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, Iss. 24. 16641. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416641>
7. Bseibsu A., Madhuranthakam C. M. R., Yetilmezsoy K., Almansoori A., Elkamel A. Numerical Simulation of Dispersion Patterns and Air Emissions for Optimal Location of New Industries Accounting for Environmental Risks. *Pollutants*. 2022. Vol. 2, Iss. 4. P. 444–461. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants2040030>
8. Eslamidoost Z., Arabzadeh M., Oskoie V., Dehghani S., Samaei M., Hashemi H., Baghapour M. Dispersion of NO2 pollutant in a gas refinery with AERMOD model: A case study in the Middle East. *Journal of Air Pollution and Health*. 2022. Vol. 7, No 3. P. 309–322. DOI: <https://doi.org/10.18502/japh.v7i3.10544>
9. Eslamidoost Z., Samaei M. R., Hashemi H., Baghapour M. A., Arabzadeh M., Dehghani S., Rajabi S. Assessment of air quality using AERMOD modeling: a case study in the Middle East. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, Iss. 11. Art. 1272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11879-2>
10. Nath A., Dhal G. C. CALINE4 and AERMOD modelling for roadway vehicle-related air pollution: a recent review in India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34701-z>
11. Normatova M., Pardayeva S. Reducing dust pollution in the production of mass explosions in quarries. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 525. Art. 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452501003>
12. Rezaali M., Fouladi-Fard R., O'Shaughnessy P., Naddafi K., Karimi A. Assessment of AERMOD and ADMS for NOx dispersion modeling with a combination of line and point sources. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2025. Vol. 39, Iss. 2. P. 813–827. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02903-z>
13. Shuvalov V., Khazins V., Krashennnikov A., Soloviev S. Formation and Evolution of a Dust Cloud as a Result of TNT Detonation in a Borehole: Numerical Simulation. *Mining*. 2023. Vol. 3, Iss. 2. P. 261–270. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining3020016>
14. Tan A. Z. L., Ho W. S., Hassim M. H., Abdullah F., Lim L. Y. Evaluation of industrial air pollution contribution by type of industry in Pasir Gudang using AERMOD. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2025. Vol. 197. Art. 385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13797-x>

O. O. MEDVEDIEVA¹, V. V. BILIAIEVA², P. S. KIRICHENKO³, V. A. KOZACHYNA^{4*},
A. Yu. USENKO⁵

¹M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (098) 506 98 00, e-mail medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

²Dep. «Natural Sciences and General Engineering Disciplines», LLC «Technical University «METINVEST POLYTECHNIC»», Southern Highway, 80, Zaporizhzhia, Ukraine, 69008, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

³Dep. «Heat and gas supply», drainage and ventilation, Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{4*}Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Dep. «Energy Systems and Energy Management», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMI, Science Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail usenko.pte@ukr.net, ORCID 0000-0001-7467-6220

Mathematical Modeling of Air Pollution After a Quarry Explosion: Express Forecast

Purpose. Development of a CFD model that makes it possible to quickly predict the level of dust pollution of atmospheric air after an explosion in a quarry, development of a fast CFD calculation model. **Methodology.** To solve the aerodynamics and mass transfer problem, the fundamental equations of continuum mechanics are used. The air flow velocity field is modeled using the Laplace equation for the velocity potential. Numerical integration of the Laplace equation is carried out using the splitting method. After splitting, difference equations are constructed that can be solved by an explicit formula. The G. Marchuk model is used to model the distribution of dust in atmospheric air. Difference splitting schemes are used for numerical integration of the mass transfer equation. At the first stage, physical splitting is carried out into the equations of diffusion and convective dust transport. Then, alternating triangular difference splitting schemes are constructed. The terrain is modeled on a rectangular difference grid using markers. **Findings.** A set of numerical models has been developed to solve the problems of aerodynamics and mass transfer of a significant impurity in atmospheric air. Finite-difference splitting schemes have been used to build numerical models, which allow obtaining simple calculation dependencies. The constructed numerical models make it possible to quickly calculate the dynamics of dust pollution in conditions of complex terrain. **Originality.** Numerical models have been built to analyze the dynamics of dust pollution of atmospheric air after an explosion in a quarry. The model makes it possible to take into account the geometric shape of the relief, weather conditions, the rate of gravitational dust deposition, atmospheric diffusion, and the shape of the dust cloud after the explosion. The model can be used for rapid assessment of the impact of explosions on the environment. **Practical value.** A specialized package of computer programs has been developed to conduct a computational experiment based on the constructed numerical models. The results of the numerical experiment are presented.

Key words: air pollution; dust cloud; quarry; CFD modeling; mass transfer

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD modeliuвання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та пративників на робочих місцях*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Biliaiev M. M., Kalashnikov I. V., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A. & Berlov O. V. (2025). *Tekhnologii zakhystu navkolyshnoho seredovishcha: zakhyst povitrianoho seredovishcha*. Zaporizhzhia: STATUS. (in Ukrainian)
3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Samarskiy A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Agibayeva, A., Khalikhan, R., Guney, M., Karaca, F., Torezhan, A., & Avcu, E. (2022). An Air Quality Modeling and Disability-Adjusted Life Years (DALY) Risk Assessment Case Study: Comparing Statistical and Machine Learning Approaches for PM2.5 Forecasting. *Sustainability*, 14(24), 16641. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416641> (in English)

7. Bseibsu, A. Madhuranthakam, C. M. R., Yetilmezsoy, K. Almansoori, A., & Elkamel, A. (2022). Numerical Simulation of Dispersion Patterns and Air Emissions for Optimal Location of New Industries Accounting for Environmental Risks. *Pollutants*, 2(4), 444-461. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants2040030> (in English)
8. Eslamidoost, Z., Arabzadeh, M., Oskoie, V., Dehghani, S., Samaei, M., Hashemi, H., & Baghapour, M. (2022). Dispersion of NO₂ pollutant in a gas refinery with AERMOD model: A case study in the Middle East. *Journal of Air Pollution and Health*, 7(3), 309-322. DOI: <https://doi.org/10.18502/japh.v7i3.10544> (in English)
9. Eslamidoost, Z., Samaei, M. R., Hashemi, H., Baghapour, M. A., Arabzadeh, M., Dehghani, S., & Rajabi, S. (2023). Assessment of air quality using AERMOD modeling: a case study in the Middle East. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11879-2> (in English)
10. Nath, A., & Dhal, G. C. (2024). CALINE4 and AERMOD modelling for roadway vehicle-related air pollution: a recent review in India. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34701-z> (in English)
11. Normatova, M., & Pardayeva, S. (2024). Reducing dust pollution in the production of mass explosions in quarries. *E3S Web of Conferences*, 525, 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452501003> (in English)
12. Rezaali, M., Fouladi-Fard, R., O'Shaughnessy, P., Naddafi, K., & Karimi, A. (2025). Assessment of AERMOD and ADMS for NO_x dispersion modeling with a combination of line and point sources. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(2), 813-827. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02903-z> (in English)
13. Shuvalov, V., Khazins, V., Krasheninnikov, A., & Soloviev, S. (2023). Formation and Evolution of a Dust Cloud as a Result of TNT Detonation in a Borehole: Numerical Simulation. *Mining*, 3(2), 261-270. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining3020016> (in English)
14. Tan, A. Z. L., Ho, W. S., Hassim, M. H. Abdullah F., & Lim L. Y. (2025). Evaluation of industrial air pollution contribution by type of industry in Pasir Gudang using AERMOD. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13797-x> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.07.2025

Прийнята до друку: 19.12.2025

УДК 519.6:[502.3:504.5]

T. I. RUSAKOVA¹, O. V. BERLOV^{2*}, O. I. GUBIN³, O. Yu. GUNKO⁴, P. B. MASHYKHINA⁵¹Dep. «Life Safety», Oles Honchar Dnipro National University, Haharin Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 394 52 14, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578^{2*}Dep. «Labor Protection, Civil and Technogenic Safety», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548³Dep. «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9434-2367⁴Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0001-9257-763X⁵Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204**Environment Pollution Modeling on the Base of Quick Computing Models**

Purpose. Development of a fast calculation models for determining zones of ground waters and air chemical pollution during the emission of chemically hazardous substances from anthropogenic sources of pollution. To model the process of passive impurity transfer in ground waters and in atmospheric air, the G. Marchuk model is used, which takes into account the speed and direction of the flow, the intensity of the emission of chemically hazardous substances, and atmospheric diffusion (dispersion in round waters). **Methodology.** The process of ground waters and air pollution modeling is based on the numerical integration of the mass transfer equation (G. Marchuk model). Two numerical models were built. One numerical model was built to simulate ground waters pollution. Another numerical model was built to simulate air pollution. The construction of a numerical models of the impurity propagation process was carried out by splitting of the mass transfer equation (G. Marchuk model). Then a variable-triangular finite-difference decomposition schemes were used for numerical integration. The unknown value of the concentration of a chemically hazardous substance is carried out using explicit formulas. A set of applied programs has been developed based on the constructed numerical models. **Findings.** A set of applied programs has been developed based on the constructed numerical models. The results of numerical calculations are presented, showing the efficiency of the proposed numerical models. **Originality.** Proposed numerical models of mass transfer allow to compute quickly the areas of chemical air pollution due to the emission of toxic substances from anthropogenic sources of pollution. **Practical value.** Based on the proposed numerical models, a computer code has been developed. The developed models and computer code make it possible to estimate the size and intensity of environmental pollution, and can be used in solving the problem of assessing the negative impact on the ground waters and air from different sources. The results of numerical calculations show the operability of the proposed models.

Key words: ground waters pollution; air pollution; landfills; emergency release; mathematical model; numerical simulation

Introduction

Landfills for solid construction waste are long-term sources of environmental pollution. Almost every country has a significant number of such landfills. These sources has intensive negative effect on the ground waters and air pollution (Fig. 1).

Therefore, considerable attention is paid to the problem of assessing the impact of landfills for solid household waste on the environment, the emission of hazardous substances from landfills [2–6, 8, 9] and the problems of reducing the negative impact on the environment [6].



Fig. 1. Fire sources at the landfill
[https://opentv.media/v-dnepropetrovskoj-oblasti-sejchas-gorit-poligon-bytovyh-othodov-foto]



Fig. 2. Accidental emission at the enterprise
[https://24tv.ua/avariya_na_fukusimi_1_fakti_pro_moto_roshnu_katastrofu_v_yaponiyi_n1185905]

Another problem in the field of environmental safety is atmospheric air pollution during extreme situations at enterprises (Fig.2). Powerful emissions of chemically hazardous substances into the air during such extreme situations lead to large-scale environmental pollution. Therefore, it is very important for practice to have mathematical models for predicting environmental pollution during emergency emissions at enterprises.

Analysis of recent research. Problem of environment pollution is of great interest. Pollution may be caused by industrial emissions, accidental emissions, inflow of toxic pollutants from landfills to ground waters, etc. Many tools were developed to predict atmosphere pollution in case of different emissions. These tools may be divided in some groups:

1. Simplified mathematical models – are used for quick prediction of atmosphere pollution at industrial sites (for example, Berlyand’s model). As a rule these are empirical models which do not demand detail information about the atmosphere conditions or source of emission.

2. Gauss models – are widely used for atmosphere pollution prediction. The models are semi-empirical. These models allow to obtain important information for steady-state emissions from different sources. Some well-known commercial codes were developed on the basis of Gauss models (for example, AERMOD).

3. Analytical models which can be used for steady state emissions or accidental emissions.

4. Numerical models which are based on numerical integration of mass transfer equation [1, 2, 4–10].

5. CFD models which are based on numerical integration of Fluid Dynamics models and equation

of Mass Transfer. Some well-known commercial codes were developed on the basis of these models (For example, ANSYS Fluent, MODFLOW).

But the problem of quick computing mathematical models development for air pollution problems is still exist. Engineers need «diagnostic» models which allow to predict quickly air pollution using standard input information.

Purpose

Development of quick computing mathematical models to be used in applied calculations of ground waters and atmosphere pollution problems.

Methodology

In this paper, we will consider an express models for assessing the areas of chemical pollution of ground waters and atmospheric air. Therefore, the prediction of pollution areas in ground waters is carried out on the basis of a 2D model of the transport of impurities (planning model, G. Marchuk’s model) [1, 2, 8]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i)(y - y_i), \quad (1)$$

where S is the average (by transfer height) value of the concentration of a chemically hazardous substance; u, v – components of the speed vector in the projection on the x, y coordinate axes, respectively; x_i, y_i – Cartesian coordinates of the i -th source of emission of a chemically hazardous substance at the facility; t – time; s ; μ_x, μ_y – dispersion coefficients; $\delta(x_i, y_i)$ – Dirac delta function, which is used to specify the location of the pollutant release in the model. The emission intensity of a chemically hazardous substance is equal to Q .

For equation (1), the following boundary conditions are implemented:

1. At $t = 0$, the impurity concentration in the study area is given.

2. At the boundaries where the flow enters the study area, the condition S is set = S_1 , where S_1 is the known concentration of the impurity.

3. At the boundaries where the flow leaves the study area is given $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$, where n is the unit vector normal to the boundary.

To simulate air pollution, Eq. (1) is also used and in this case: μ_x, μ_y – are diffusion coefficients.

For numerical integration of the transport equation for ground waters pollution problems the following splitting for Eq. (1) was used:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^N Q_{S_i}(t) \delta(x - x_i)(y - y_i). \quad (4)$$

For the numerical solution of equation (2), the following two-step splitting scheme is used:

– the first step uses the dependency:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2},$$

– in the second step, the dependency is used:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

$$\text{where } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}$$

For the numerical solution of equation (3), the following two-step splitting scheme is used:

– the first step uses the dependency:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2},$$

– in the second step, the dependency is used:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

$$\text{where } v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

For numerical integration of equation (4), the Euler method is used.

To develop the second numerical model for air pollution modeling, Eq. (1) was split at the difference level (here we use another notation for impurity concentration “C”):

– the first step of splitting ($k=1/4$):

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l;$$

– the second step of splitting ($k = n+1/2$; $c = n+1/4$):

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l;$$

– the second step of splitting ($k = n+3/4$;
 $c = n+1/2$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

– the fourth step of splitting ($k = n+1$;
 $c = n+3/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

In these expressions L_x, L_y, \dots are difference operators. These operators are described in [1].

Both finite-difference models were coded. For programming of the developed numerical models FORTRAN was used. Computer code includes some SUBROUTINES which perform calculation of each step of splitting for each finite-difference model.

Following input data are used for numerical experiment:

1. information about dimensions of the computational area where the numerical experiment will be carried out;
2. industrial site position (for example, waste landfill position or railway station position where the accidental release may take place);
3. time step;
4. parameters of atmosphere stability, dispersion coefficients, wind speed and wind direction (speed of ground waters flow and direction of this flow);
5. toxic substance emission rate.
6. dimensions and form of emission source.
7. time of emission.

Findings

Based on the developed numerical models, two model problems were solved. The first problem considers the location of a possible landfill near the village and ground waters pollution in case of contaminate inflow from the landfill to ground waters. (Fig. 2).

It is assumed that the ground waters speed was 0.000002 m/s. The HCL emission intensity from the landfill is assumed to be equal to 1 (dimensionless value).

The simulation results are shown in Fig. 3.

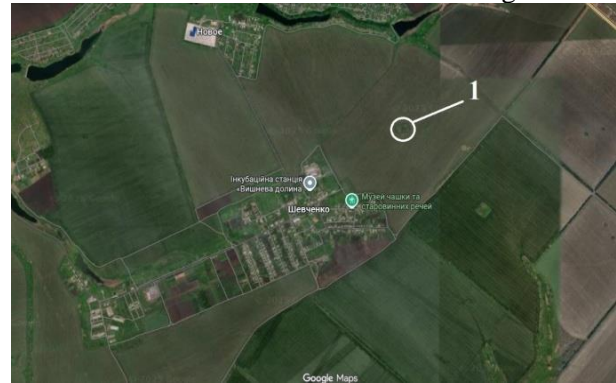


Fig. 3. Location of possible landfill, (Google Image 2025)



Fig. 4. Contamination zone, HCL concentration:
1 – $C = 82 \text{ mg/m}^3$; 2 – $C = 61 \text{ mg/m}^3$; 3 – $C = 37 \text{ mg/m}^3$

One can see from Fig. 4 that intensive zone of contamination of ground waters is formed near the landfill. This zone can cause contamination of water in wells which are used in the village which is situated near the landfill

Below are the results of solving the second problem – an emergency release at an railway station (fire of oil tank). Wind speed was 8 m/s.

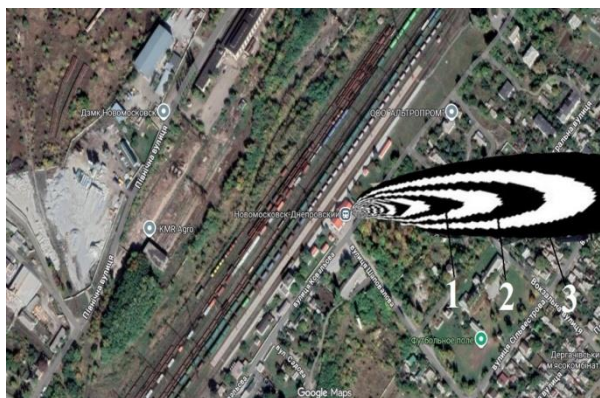


Fig. 5. Area of contamination, CO concentration:
 1 – $C = 158 \text{ mg/m}^3$; 2 – $C = 96 \text{ mg/m}^3$; 3 – $C = 71 \text{ mg/m}^3$

As one can see from Fig.5, large contamination zone is formed near the source of emission.

It took 2 sec to obtain results of numerical experiment. Developed computer code allows to obtain dimensions of contaminated zone and intensity of contamination. Standard input information is used for numerical modeling.

Originality and practical value

Numerical models have been proposed for the operational determination of areas of pollution from anthropogenic sources.

Computer code was developed using FORTRAN. This computer code can be used for

operational solution of several applied problems in the field of environmental safety (ground waters and air pollution problems).

Modeling of ground waters and atmosphere pollution is carried out using standard input information. That is important for practical use of developed numerical models. Results of computer experiment are presented as the contamination zones.

Conclusions

1. Quick computing numerical models have been developed for analyze of contamination zones which are formed near different sources of toxic pollutants emission.

2. Fundamental equation of mass transfer (mass conservation law) was used as the basis of numerical model. This equation takes into account wind velocity speed (ground waters speed and direction), it's direction, atmosphere stability, intensity of toxic pollutant emission

3. Developed numerical models can be used for prediction of ground waters and atmosphere pollution in case of release of toxic pollutants from different sites and sources.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Жук Г. В., Предун К. М. Екологічні аспекти використання біогазів полігонів твердих побутових відходів для потреб енергопостачання населених пунктів України. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2018. Вип. 26. С. 69–74.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
4. Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. *Тверді відходи: збір, переробка, складування* : навч. посіб. Київ : Кондор, 2010. 550 с.
5. Сатін І. В., Куций Д. В. Емісії парникових газів з місць видалення побутових відходів та заходи щодо їх скорочення. *Наукові доповіді національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2024. Т. 20, № 3/109. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003)
6. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. 2011. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
7. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life*. 2018. Vol. 9, No. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>

8. Lacomme J.-M., Truchot B., Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (Bologna, 9-12 Oct. 2017). Bologna, 2017. P. 1–5.
9. Ngusale G. K., Oloko M. O., Otiende F., Aguko K. P. Estimation of methane and landfill gas emission from an open dump site. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2021. Vol. 28, No 3. P. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijewm.2021.118368>
10. Trung T. D. B., Tri D. Q. Application of the AERMOD Model to Evaluate the Health Benefits Due to Air Pollution from the Public Transport Sector in Ha Noi, Viet Nam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2022. Vol. 10, No. 3. P. 13–33. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.103002>

Т. І. РУСАКОВА¹, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, О. І. ГУБІН³, О. Ю. ГУНЬКО⁴, П. Б. МАШИХІНА⁵

¹Каф. «Безпеки життєдіяльності», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, пр. Гагаріна, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 394 52 14, ел. пошта gusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

^{2*}Каф. «Охорони праці, цивільної та техногенної безпеки», Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

³Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9434-2367

⁴Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0001-9257-763X

⁵Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

Моделювання забруднення довкілля на базі швидко розрахункових моделей

Мета. Розробка швидко розрахункових моделей для визначення зон хімічного забруднення підземних вод та повітря при емісії хімічно небезпечних речовин від антропогенних джерел забруднення. Для моделювання процесу переносу пасивної домішки в підземних водах та в атмосферному повітрі використовується модель Г. Марчука, що враховує швидкість та напрям руху потоку, інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини, атмосферну дифузію (дисперсію). **Методика.** Процес моделювання забруднення підземних вод, атмосферного повітря базується на чисельному інтегруванні рівняння масопереносу (модель Г. Марчука). Побудова чисельних моделей процесу поширення домішки здійснюється шляхом розщеплення рівняння масопереносу. Далі будуються дві кінцево-різницевої схеми розщеплення. Невідоме значення концентрації хімічно небезпечної речовини визначається за допомогою явних формул, що дозволяє розробити простий алгоритм рішення різницевої рівнянь. **Результати.** Розроблений комплекс прикладних програм на базі побудованих чисельних моделей. Наведені результати чисельних розрахунків, що показують працездатність запропонованих чисельних моделей. **Наукова новизна.** Запропоновані чисельні моделі масопереносу, що дають можливість швидко розраховувати області хімічного забруднення підземних вод та атмосферного повітря при емісії токсичних речовин від антропогенних джерел забруднення. **Практична значимість.** На базі запропонованих чисельних моделей розроблений комп'ютерний код. Розроблені моделі та комп'ютерний код дають можливість швидко оцінювати розміри та інтенсивність забруднення довкілля, та може бути використани при рішенні двох класів задач по оцінюванню антропогенного впливу на навколишнє середовище від антропогенних джерел забруднення.

Ключові слова: забруднення підземних вод, забруднення повітря; полігони відходів; аварійний викид; математична модель; чисельне моделювання

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannia v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochych mistsiakh: monohrafiia*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Zhuk, H., & Predun, K. (2018). Ecological Aspects of the Biogas Usage from Disposal Sites of Solid Domestic Waste for The Energy Supplyneeds of Ukrainian Residential Areas. *Ventylatsiia, Osvitlennia ta Teplohazopostachannia*, 26, 69-74. (in Ukrainian)
3. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Hrusch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislenoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
4. Radovenchuk, V. M., & Homelia, M. D. (2010). *Tverdi vidkhody: zbir, pererobka, skladuvannia: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: Kondor. (in Ukrainian)
5. Satin, I. V., & Kutsyi, D. V. (2024). Greenhouse Gas Emissions From Municipal Waste Disposal Sites and Measures for Its Reduction. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 20(3/109). DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003) (in Ukrainian)
6. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and Its Application XXI*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
7. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life*, 9(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
8. Lacombe, J.-M., Truchot, B. & Duplantier, S. (2017, Oct.). Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. In *Proceedings of 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. (pp. 1-5). Bologna, Italy. (in English)
9. Ngusale, G. K., Oloko, M. O., Otiende, F., & Aguko, K. P. (2021). Estimation of methane and landfill gas emission from an open dump site. *International Journal of Environment and Waste Management*, 28(3), 317-327. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijewm.2021.118368> (in English)
10. Trung, T. D. B., & Tri, D. Q. (2022). Application of the AERMOD Model to Evaluate the Health Benefits Due to Air Pollution from the Public Transport Sector in Ha Noi, Viet Nam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(3), 13-33. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.103002> (in English)

Надійшла до редколегії: 25.07.2025

Прийнята до друку: 24.12.2025

UDC 627.25:621.311.25(477.64)V. YU. ULYANOV^{1*}, V. V. BILYK^{2*}^{1*}Independent researcher, e-mail uluanovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408^{2*}Laboratory of Research of Nuclear and Thermal Power Plants, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, e-mail kolemasakar@gmail.com, ORCID 0000-0002-4435-2388-2388**On the Need to Conduct Additional Stress Tests to Evaluate the Safety of the Hydraulic Structures Site at the Zaporizhzhia NPP**

Purpose. Conducting a comprehensive analysis concerning the condition of the cooling pond dam at the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant (NPP), which is a key component in the hydraulic structures system at this NPP, to justify further research. Additionally, identifying any extra or previously unaccounted factors that could affect the overall safety of the structure. **Methodology.** The authors performed a comprehensive review of all available engineering surveys and geotechnical research materials related to the Zaporizhzhia NPP cooling pond dam. These materials were produced by various organizations starting from the completion of the facility in 1985, with particular focus on the period 2011–2018, especially after the publication of the 2011 stress test report. Special attention was given to high-precision geodetic data on settlements and deformations of grades on the cooling pond dam. This enabled a new perspective on the findings of the engineering and geological surveys, as well as the stress tests conducted based on them. **Findings.** Based on the analysis of the dam body soil research data, previously unaddressed issues were raised and examined, including those related to the facility's operation. The need to conduct new stress tests was justified, considering the current conditions at the NPP site and its surroundings. **Practical value.** For the first time, a comprehensive analysis of the facility's condition was conducted based on accumulated geotechnical data. The stress tests performed in 2011 were found to be overly optimistic. **Originality.** The need for further research on the facility was justified, including through a program to evaluate the technical condition of the cooling pond dam using innovative methods from the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Keywords: Zaporizhzhia NPP; cooling pond dam; alluvial sands; soil liquefaction; dynamic instability; settlement; creeping of slopes

Introduction

During the analysis of high-precision geodetic observations of the cooling pond dam settlement at Zaporizhzhia NPP, a key facility within the plant's hydraulic structures system, as well as the results of engineering and geological surveys conducted from 2012 to 2018, it was suggested that the bearing properties of the sand foundations and the structure's body are influenced by many other factors beyond those previously identified. It was also found that earlier research and observations are clearly insufficient to determine the causes of the ongoing instability of the cooling pond dam settlement. The need to monitor this critical facility for the safe operation of the NPP

arises from current regulatory requirements and departmental job descriptions for NPP hydraulic structures. Repeatedly, employees of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (now known as the Educational and Scientific Institute at the Ukrainian State University of Science and Technologies) have emphasized the need for further research on the cooling pond dam. Given its current condition and surrounding situation, the importance of this facility requires that all research focus on a dedicated section, separate from other structures at the NPP site. This article aims to justify the inadequacy and incompleteness of all previous research and to address some questions regarding po-

tential causes of ongoing settlements of individual buildings and structures at the NPP site.

Note. The events after further complicated the situation at the site of the NPP hydraulic structures, but the analysis of their consequences is already beyond the scope of this work and is the subject of further research.

Purpose

A comprehensive analysis of the condition of the cooling pond dam at the Zaporizhzhia NPP, a key component of the hydraulic structures system at this NPP, is required to justify further research. As well as the identification of additional and previously unaccounted factors that may affect the safety of the structure as a whole.

Methodology

Physical and geographical conditions. Administratively, the study area is located in the city of Enerгодар, Zaporizhzhia region, in the western part of the NPP industrial zone, within the hydraulic structures site. Geomorphologically, the research territory lies within the first above-floodplain (sandy) left-bank Vitachiv-Bug terrace of the Dnieper River and on the left bank of the Kakhovka Reservoir. Before construction, the research area was characterized by the water area of the Kakhovka Reservoir, primarily formed by the flooded floodplain of the Konka River and partially located on the coastal terrace of the Dnieper River, with aeolian landforms. Absolute surface levels range from 18.00 m to 25.0 m, while the bottom surface of the Kakhovka Reservoir varies from 8.0 m to 9.8 m. The surface relief of the dam body is gently rolling and mainly eolian, created by wind-blown sands. In some areas, sands are stabilized by woody and herbaceous vegetation. The surface levels here range from 16.0 to 22.0 m, with the average crest level between 18.5 and 19.8 m. The main water bodies influencing the hydrogeological conditions of the research territory include:

- Kakhovka Reservoir;
- cooling pond.

Characteristics of hydraulic structures of the NPP. The hydraulic structures of the Zaporizhzhia NPP are a complex of engineering structures, including a cooling pond dam with blowdown structures, inlet and outlet channels, several pumping stations for various purposes, spray ponds, cooling towers, access roads, underground and overground utility networks (Fig. 1). The combined use of such hydraulic structures as a cooling pond, spray ponds, and cooling towers allows combining the maneuverability and inertia of coolers in changing weather conditions. This scheme has no analogues and, in fact, was at one time experimental, which later caused the emergence and existence of problems associated with the soils on which individual structures of this system are located, in particular, the cooling pond dam. The cooling pond is formed by fencing off a part of the water area of the Kakhovka Reservoir by means of alluviation of a sand dam, and is a water body where the effect of heated discharge waters of the NPP is closed. From the south and east, the dam adjoins the shore; from the north and west, it is washed by the waters of the Kakhovka Reservoir, which has a normal retention level at an absolute elevation of +16.0 m and a «dead» volume level of +12.0 m (according to other data – 12.7 m). The dam of the cooling pond has the shape of an irregular arc and measures 5.830 km in length (including the levee of the cargo berth). The maximum point marks of the levee ridge are 19.0...22.0 m. The width along the water's edge varies from 216 to 590 m. The dam type is an earthen alluvial dam without anti-filtration systems (devices). The dam kind is homogeneous, with freely formed slopes, a wide-profile (flattened profile). Adopted based on the technical and economic justification of the General Designer due to the need to reduce the volume of slope reinforcement. Material is fine and medium Quaternary eolian-alluvial sands of the Dnieper and Konka river valleys. The laying method is mainly alluviation by means of hydraulic mechanization under water to a depth of up to 8 m, and partly by the «dry-excavated» technique [1–3, 7, 11].



Fig. 1. The tail-water channel from the cooling towers on the dam of the Zaporizhzhia NPP cooling pond (photo 2010)

Engineering and geological characteristics of the site. The geological structure of the area includes granites of the Archean-Proterozoic age, which form the crystalline basement of the Ukrainian Crystalline Shield (approximately at a depth of about 60 m), covered by a layer of clays of the Seryozh stage of the Paleogene, presumably lying on sandstones of the Buchak stage of the Paleogene. In the research area, clays of the Seryozh stage are greenish-gray, dense with rare inclusions of sandstone nodules, and were exposed at a depth of 33 ... 35 m. Paleogene clays underlie a layer of Quaternary eolian-alluvial sands with a thickness of about 20 m, on which the dam of the cooling pond rests. The dam was erected on fine eolian-alluvial sands using the hydraulic filling method. The dam body is non-uniform in density. In the thickness of the soils of the dam base, floodplain sandy loams are fragmentarily located, and floodplain loams are almost everywhere. The loams are dark gray, with an admixture of plant residues, soft-plastic consistency, and a thickness of 0.2 to 1.2 m. Fine alluvial sands of natural composition with a thickness

of up to 14 m lie below. Alluvial sands underlie the fine sands, but of medium size.

History of the construction of the NPP cooling pond dam. Since the mid-80s, low-pressure fill dams have been widely used on cooling reservoirs of nuclear and thermal power plants and protective levees on reservoirs with beach wave-absorbing dynamic slopes. This method of wave damping in shallow water is taken from the natural analogue of sea sand beaches. Such a design of hydraulic levees from sandy or sand-gravel soils, with the laying of the upstream slope of 1:30 – 1:40 at a dam height of up to 5 m, turned out to be more economical than with the traditional laying of 1:3 – 1:5 with slope reinforcement with stone or concrete. At the same time, the increase in the volume of alluviation in terms of cost was offset by the simplification of alluviation technology, which reduced the need for fastening. A typical example of the use of hydraulic levees with a beach wave-absorbing slope was the construction of the protective levee of the Zaporizhzhia NPP on the Kakhovka Reservoir. The initial project envisaged the dumping of a stone bench

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

with a volume of 1.7 million m³ into the water. The decision to replace the stone bench with sand dams with an above-water slope of 1:50 (Note: in later projects, the above-water slope was 1:40 and 1:45) and an underwater slope with location of 1:7 was made after conducting research and heated debates in the Ministry of Energy of the former USSR with the support of the Chief Engineer at the “Hydroproject” Institute T. P. Dotsenko and the Chief Hydraulic Engineer at the “Atomteploelektroproekt” Institute R. G. Minosyan. The actual savings from the implementation of this decision amounted to about \$ 30 million USD. The construction of sand dams with a beach wave-absorbing slope became possible only thanks to the use of hydromechanization, a major achievement in domestic hydraulic engineering in those years [16].

Conclusions of the stress tests of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine for the site of hydraulic structures of the NPP in 2011. The

main conclusions from the national report on the results of stress tests of the NPP site in 2011, compiled by the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (regarding Zaporizhzhia NPP is given in Section 3 of the report on pp. 55...58) are as follows [4].

The assessment of dam failure events was performed for the most conservative case, namely, the failure of all dams of the Dnieper cascade upstream of the Zaporizhzhia NPP, but under the condition of maintaining the operability of the dam of the Kakhovka HPP (it is located downstream of the Zaporizhzhia NPP along the Dnieper River) (Fig. 2). Based on the results of a detailed analysis, the maximum possible level in the Kakhovka Reservoir was determined to be 19.36 m, which is lower than the planned elevation of the site of the main NPP units of 22.0 m, which, in particular, is located on the indigenous bank on natural soils.

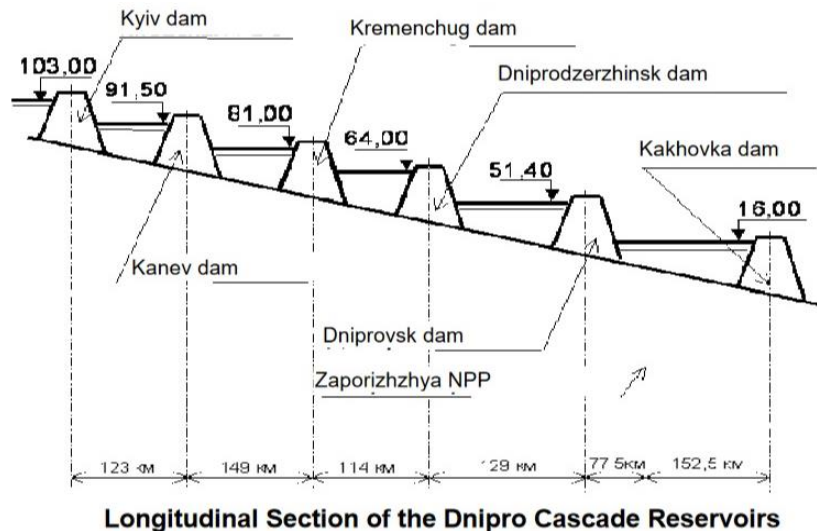


Fig. 2. Longitudinal section of the reservoirs of the Dnieper cascade of hydroelectric power plants (HPP)

The scenario for the degree of impact on the NPP site, and in particular on the cooling pond dam, was divided into several stages:

– a stable normal retention level in the cooling pond;

– overflow occurs over the top of the blowdown structure and the dam crest;

– a decrease in the level in the pond through the blowdown structure until the design level is reached;

– a decrease in the groundwater level to natural values.

The following were established by calculations for filling and emptying the NPP cooling pond during the passage of a breakthrough wave of the upstream reservoirs of the Dnieper Cascade HPPs:

– an increase in the level in the NPP cooling pond will occur above the normal level to the 16.70 m mark;

– the time for the water level to rise in the cooling pond will be about six days;

– the additional volume of water entering the cooling pond from the Kakhovka Reservoir during the passage of the breakthrough wave will be approximately 2.0 million m³;

– the water level in the cooling pond will decrease to the design level of 16.5 m within 29 days (43 days after the breakthrough);

– the above-mentioned fluctuations in the water level in the NPP cooling pond will not affect the safety of power units No. 1...6, since the planned elevation of the industrial site at their location is 22.0 m, which is 2.64 m higher than the calculated maximum level in the Kakhovka Reservoir during the breakthrough of the Dnieper cascade dams;

– during the overflow into the cooling pond through the dam crest, the operation of the coolers of the technical water supply of the turbine equipment may be disrupted (the cooling towers and spray pools located on the dam will not work);

– the rise and fall of the water level will occur quite slowly (the maximum daily fluctuations will be less than 1.0 m/day), which will not affect the stability of the structures located on the dam and will not cause additional deformations (the spray pools and the pumping station are protected by drainage, and the cooling towers are built on a pile foundation);

– for a northwest wind direction (during the passage of a breakthrough wave in the Kakhovka Reservoir) with a velocity of $W = 17$ m/s (50% probability), the calculated wave height will not exceed 0.90 m. The height of the wind surge will be about 0.02 m, the wave run-up on the slope is 0.24 m.

Wave effects will cause minor reworking of the dam slope up to 10 m wide, which will practically not disrupt the design profile of the dam (width along the crest 250 ... 400 m);

– when passing the peak of the breakthrough wave, the water flow velocity in the Kakhovka Reservoir will be at least 0.82 m/s. This velocity was recognized as erosive for fine-grained sands that make up the unreinforced outer slope of the cooling pond dam. The erosion of the coastal slope of the cooling pond dam by the water flow will occur during the period when the water flow velocity exceeds 0.5 m/s. This velocity is possible for about 5 days. The washed-away soil will be deposited on the underwater part of the dam slope. According to calculations, in this case, the width of the damaged section of the dam will allegedly be less than ten meters.

In addition, as part of the «stress tests», the possibility of water loss from the NPP cooling pond, which may occur due to the destruction of the Kakhovka HPP dam after a probable seismic event, was considered. It was determined that the minimum water level in the Kakhovka Reservoir at the NPP site in the event of a dam break of the Kakhovka HPP hydroelectric complex will be 10.0 m. According to the developers of the document, due to the significant width of the enclosing dam of the cooling pond, the dam itself will not be destroyed. However, as a result of the destruction of the Kakhovka HPP dam, the NPP cooling pond water may be lost. In this case, it will also inevitably affect the operability of the system for feeding the spray pools of the technical water system of branch consumers. For this scenario of events and prevention of the impact of the consequences of accidents at hydraulic structures on the NPP structures, the following measures were planned, namely:

– a detailed analysis of the possibility of losing water from the cooling pond as a result of the destruction of the Kakhovka HPP dam;

– development of additional measures to ensure makeup of the spray pools of the technical water system of responsible consumers.

The situation at the sites of Ukrainian NPPs and, in particular, the Zaporizhzhia NPP was also described in a number of publications that were published immediately after the publication of the stress test report [5].

Characteristics of engineering-geological surveys on the dam of the cooling pond up to 2014.

Modern geological and engineering-geological processes and phenomena. During the operation of hydraulic structures, negative man-made processes were recorded. In 1993, the slope of the bucket adjacent to pumping station No. 1 on the side of the spray ponds collapsed. In the spring of 1993, a landslide of the coastal ledge made of loose backfill sand was recorded at the dam of the cooling pond at the junction with the pumping station supplying water to the cooling towers. In both of these cases, the causes of the landslide processes were not fully clarified. The coastal slopes near pumping station No. 1 continue to be in an emergency condition to this day (2014), negative man-made processes are manifested in the form of collapse (sliding) of the coastal zone, destruction of the building's blind area, and subsidence of the concrete slope.

The following was established based on the results of the visual inspection of the cooling pond dam:

1.1 intensification in the processes of processing the shoreline of the inner slope of the dam (erosion, landslides, formation of bays), mainly in places where there is no rubble fill;

1.2 non-design man-made reservoirs (lakes) on the dam;

1.3 re-profiling of the upper part of the prism (displacement of soil masses, formation of benches) in the area between the outlet channel from the cooling towers (the highway and the shoreline);

1.4 processing of the shoreline of the outer slope of the dam (erosion of slopes, formation of beaches) in places where there is no or deformation of rubble fill;

1.5 intensification of the processes of processing the shoreline of the outer slope of the dam (formation of benches and terraces);

1.6 re-wintering of sands of the inner part of the dam in areas not fixed by grass and woody vegetation (Fig. 3, 4).



Fig. 3. Destruction of the slope fastening at the pumping station supplying water to the cooling towers (photo 2010)



Fig. 4. Reworking of the coastal slope of the cooling pond dam from the side of the Kakhovka Reservoir (photo 2010)

Forecast of changes in engineering and geological conditions. The stability of the dam body, which is made of water-saturated loose and unconsolidated alluvial fine sands, is not guaranteed. In a water-saturated state, loose sands are dynamically (seismically) unstable and can liquefy, leading to a complete loss of bearing capacity even under minor dynamic (seismic) loads. The most significant threat to the stability of the dam body comes from seismic impacts during a design earthquake of magnitude 6. At the maximum earthquake level of 7 points, which is adopted for the territory of hydraulic structures, liquefaction of sands within the dam body becomes unavoidable.

Geodetic observations of settlements and deformations of hydraulic structures at nuclear power plants. As established during the analysis of archival documents, during wash-in, observations and control over the condition of the washed-in sands were not actually conducted. At the initial stage of constructing hydraulic structures (cooling towers No. 1 and 2, spray ponds No. 1–3, and a pumping

station for feeding water to the cooling towers), zones of loose sand had already been detected in the dam body, mainly in the upper part of the geological section. During operation, the development of exogenous processes, such as the collapse of the eastern slope of pumping station No. 1 and the removal of sand into the basins and canal, was observed in certain structures. All of this necessitated additional surveys and systematic observations to develop measures for engineering protection of the structures.

Geodetic measurements were performed using a stationary system of soil grades along the dam core and coastal slopes (they were actually first initiated in 1994). The grades were initially placed along one profile, starting from the main bank up to spray pond No. 3.

High-precision geodetic observations, according to accuracy class 2, showed that between December 1997 and May 1998, the grades settled by 1 mm to 8 mm. The unevenness of settlements ranged from 6 to 12 mm. This indicates ongoing deformation of

the earth dam. Monitoring of the soil marks on the cooling pond dam ceased in 1998. Later, around 70% of the grades were destroyed during the operation of the structure and the construction of new facilities. In 2009, after an 11-year hiatus, the soil grade network was restored. The network was expanded with new soil grades distributed throughout the entire dam body along several longitudinal and transverse profiles.

Observations in 2009–2012 revealed that deformations of the cooling pond dam continue at a rate of 2...7 mm/year. The observed settlements along the core of the cooling pond dam are less than 20% of the calculated stabilized values. Based on the results of geodetic observations, deformations of the bank slope were recorded. When comparing the geodetic surveys of 1986 and 2012, their obvious discrepancy was revealed, i.e., all signs of dam erosion were present. Thus, the process of deformation of the backfill soils and the dam body itself is in a dynamic state.

Analysis of the potential flooding risk at the Zaporizhzhia NPP industrial site. The most significant external source of flooding of the NPP site may be flooding caused by possible accidents of hydraulic structures of the Dnieper cascade of reservoirs during seismic impacts.

During a breakthrough wave passing through the Kakhovka Reservoir, water flow velocities reach peak levels, causing erosion of the cooling pond's outer slope and damaging its design profile. An increase in the Kakhovka Reservoir's volume could result in the water overflowing the dam of the cooling pond.

The following will be affected: the dam of the cooling pond with a complex of structures of the cooling system of the main turbine equipment and structures located behind the enclosing dam of the cooling pond (inside the cooling pond): spray ponds No. 1, 2; feeder channel; block pumping stations No. 1 ... 6; cooling pond blowdown facility; cooling pond make-up channel.

Conclusions based on the results of engineering and geological surveys. Based on engineering and

geological surveys carried out in 1978–1983 and 2011–2012 by the NPP geological service, the following conclusions were made:

- sands that make up the dam body are characterized by a non-uniform degree of compaction and are divided into: loose and loose dynamically unstable; medium density and dense. They are also distinguished by different granulometric composition, mainly fine and less often medium-sized;
- for many areas, data on completed engineering and geological surveys at the stage of working documentation for construction are missing;
- no significant changes in the natural soils of the foundation of the structure were found;
- over the period from 1978 to 2011, a decrease in the thickness of loose sands in the dam body (core) was established, averaging 35–40%. But this is except for some areas, where an increase in the thickness of loose sands in the dam body was established, ranging from to 69% .;
- changes in the dam body indicate the process of post-compaction of the sand layer. And that the engineering and geological conditions during the survey period remain unstable (the post-compaction process is not complete), and thus the possibility of further deformations remains;
- the presence of loose sands in the dam body, especially in the first meters below the groundwater level, requires an assessment of the possibility of their liquefaction under the action of dynamic loads (earthquakes, moving vehicles, the action of filtration flows, etc.);
- according to the results of dynamic probing (2012), loose soils characterized by $P_d < 20 \text{ kgf/cm}^2$ ($P_d < 2 \text{ MPa}$) have a high probability of liquefaction, since these soils have virtually no consolidation cohesion.

However, despite the above, the 2014 conclusions stated that, overall, the levee is allegedly in a stable condition, even with large areas of loose variations in the sand massif. Geodetic measurements in 2012 did not record any significant deformations. The observed deformations and damages are purely local in nature and have a limited extent.

Additionally, the recommendations provided by the NPP geologists, listed below, directly contradict the conclusions they made.

To prevent the impact of hydraulic structure accidents on the Zaporizhzhia NPP facilities and their operation, the following main measures were previously planned, but not implemented:

- additional raising of the crest of the enclosing cooling pond dam to prevent overflow from the Kakhovka Reservoir into the cooling pond when the peak of the breakthrough wave passes;

- reconstruction (building up reinforced concrete structures and upgrading hydromechanical equipment) of the blowdown structure to prevent overflow from the Kakhovka Reservoir into the pond when the peak of the breakthrough wave passes;

- fastening the outer slope of the enclosing cooling pond dam to prevent erosion of the dam when the peak of the breakthrough wave passes in the Kakhovka Reservoir.

Recommendations of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture based on the results of the conducted research (2014). For further safe operation of the NPP cooling pond dam, it was necessary to carry out the following measures, namely:

- visual inspection of the technical condition of the cooling pond dam;

- instrumental inspection – planned high-altitude survey for the position of the soil grades of the cooling pond dam, carried out until the settlements are completely stabilized (noted by the authors of the article);

- conducting a set of geophysical research to determine the seismic parameters of the soils that make up the dam body and its foundation;

- measuring the transverse profiles of the dam body and the adjacent part of the reservoir bottom using ground-penetrating radar (land) and echolocation (water);

- control engineering and geological surveys to determine the dynamics in the development of technogenic processes (planned for 2018-2019);

- study of the petrographic microaggregate states of all varieties of dredged sands, as well as their research on vibrocreep.

This research could not be implemented for several reasons.

Findings

The results of the analysis of all available materials on the NPP cooling pond dam can be summarized as follows: the facility is crucial for safety and should receive primary focus. The basis for upgrading the cooling pond dam's status to a higher category, as well as the justification for further work on the facility, according to the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, is the following:

1. Results of studies to assess the technical condition of the structure.

Note. Since its completion (1986), the cooling pond dam has only been studied fragmentarily as a whole.

Some of the documentation on the dam has been lost.

Unfortunately, examining individual components of the dam's structure (such as block pumping stations, cooling towers, and sluice gates) does not provide any information about their condition, given the depth of their foundations and the design features of their bases. Indirect data can be gathered from the operation of spray ponds, buried pressure pipelines, and the discharge channel from the cooling towers.

The regular monitoring observations of the groundwater level in the wells on the dam itself, given its current condition, are entirely inadequate, generally uninformative, and do not offer any insights into the processes taking place within it.

2. Repeated appeals from the relevant services of the NPP regarding the erosion of the shoreline (in particular, already at 12 sites by March 2013);

Note. The periodic visual inspections of the shoreline by the NPP hydrometallurgical shop only verify the current condition and cannot determine the internal causes that led to this. The backfilling

of specific sections of the dam's outer and inner contours with stone and construction waste is not part of the project, does not account for the dam's overall condition, and generally provides only short-term, temporary stabilization.

3. Preliminary results from the analysis of the causes of changes in specific sections of the dam body along the length of the support profiles (based on data from the 2012 executive survey).

Note. Preliminary analysis of highly scattered data has revealed that in many areas, the lengths of the cross-sections have undergone significant changes. The reasons for this are unknown and still need to be determined.

The relief of the underwater slope of the dam from the Kakhovka Reservoir side is unknown, as it has never been studied using accepted hydrological methods.

The Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, based on the results of the executive survey for the cross-sections of the cooling pond dam, in particular, stated the following:

- the given comparative values, as well as the reasons for their changes, are approximate, serve mainly for the initial qualitative assessment of the intensity of geodynamic processes at the site of the NPP hydraulic structures, and need to be clarified;

- for a quantitative assessment, it is necessary to develop and implement a program to monitor the soil foundation of the dam at the NPP cooling pond. This program should include a series of geodetic observations along selected cross-sectional reference profiles of the structure, hydrological and, if needed, shallow (near-surface) engineering and geological studies, including in the water area.

- to adopt the profiles of the November 2012 geodetic survey as reference base profiles;

- the selected base profiles must be fixed on the ground in the adopted manner;

- in addition to geodetic observations along the profiles, perform similar work at selected sites located on the side of the Kakhovka Reservoir and presumably subject to the most intensive processing

of the shoreline (erosion and landslides);

- hydrological research must necessarily include work on the construction of hydrological posts and line gauges, as well as mandatory depth measurements on the side of the Kakhovka Reservoir using an echo sounder or other methods.

4. Findings and conclusions from the report of American military engineers on the condition of the dams of the Dnieper cascade «ENGINEERING EVALUATION ASSESSMENT», REPORT FINAL, July 29, 2016 [13].

5. Analysis of the results of engineering surveys on the dam of the cooling pond starting from 1996, especially for the period with the nuclear power plant in 2011 to 2018.

Note. Materials from previous engineering surveys reveal some contradictions between the actual condition of the structure and the conclusions, which do not allow for a comprehensive understanding of the soils' condition. The network of exploration well profiles is quite sparse. The condition of the soils throughout the entire structure, especially within the coastal section near the Kakhovka Reservoir, remains largely unknown. This is also evidenced by geotechnical issues at the site of pumping station No. 1 and along both banks. According to survey data, loose soils are found almost everywhere, not only on the surface but also throughout the thickness of the structure itself, mainly near the groundwater level. Some of the loose soils in the dam body are even categorized into a special layer, characterized by extremely low values of physical and mechanical properties. Additionally, in some areas, loose differences have even been found beneath natural sandy soils. Presumably, the so-called «quicksand» known in local floodplains, even before construction began, is confined to these zones. Certain features of the genesis and morphology of local sands also undoubtedly influence their properties [8]. Overall, loose differences of sandy soils within the structure are particularly sensitive to any type of dynamic impacts—including seismic activity—due to their engineering and geological features, which can ultimately negatively

affect the condition of the entire structure, given its size and location within the industrial site of the NPP.

As evidenced by the engineering survey materials from 2011–2018, the condition of the cooling pond dam was not assessed as optimistically by the authors of the reporting materials after 2012. Even then, it raised quite reasonable concerns. This is supported by numerous recommendations and the declared need for additional, highly specialized research on the soil layers. The section on recommendations regarding plans for reconstructing the entire structure deserves attention. However, the authors of the article have no information on whether these recommendations have been implemented in practice. Meanwhile, their own specialized, comprehensive research on the dam's condition, proposed by experts from Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, based on their assessment of the situation, was deemed unnecessary and thus not considered. Consequently, this research was not included in the 2021 tender documentation for additional dam investigation. In fact, the tender documents show that all dam research was limited to geodetic observations of settlements, performed by a third-party organization that had never previously worked at this NPP site and was unfamiliar with its specifics. *Moreover, these observations, after an initial cycle, were interrupted by the events of February 2022. (Authors' note).*

6. Results of high-precision geodetic observations of soil grades.

Note. The recorded settlement of the structure, which has a height of 10.5 to 13.6 meters, was up to 8 mm per year, and in some areas, such as around the cooling towers, much more. In other words, it significantly exceeded the maximum limits set by regulatory documents for structures of this type (no more than 2 mm per year). It indicates a lack of stabilization in the soils of the dam body, especially in many areas. Despite typical construction experience showing that stabilization of settlements in alluvial sandy soils within the Dnieper valley usually occurs within the first 2–3 years after construction, with

only rare cases taking up to 10 years. The work on building the cooling pond dam was essentially completed by 1985. Therefore, it appears that the unstabilised settlements of the entire structure as a whole still continue today, and their causes remain unknown.

Geodetic observations of the dam's settlement throughout its entire service life were conducted with significant interruptions and did not provide a complete picture of its planned high-altitude position. Additionally, measuring settlement at a single point (near-surface soil grade) with a profile width of up to 500 m offers no justification for approximating the data collected along the entire profile, either in length or depth (considering the thickness and condition of the dam body's alluvial soils). Essentially, it amounts to a discrete study of the soil grade's location.

The ongoing, substantial multidirectional planned displacements of soil grades recorded during geodetic research by the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture suggest complex movements of soil masses, possibly influenced by fluctuations in the cooling pond and the Kakhovka reservoir, as well as the operation of cooling towers and spray ponds.

The revealed discrepancy between the current position of the majority of the requirements of individual clauses of the regulatory document SOU-N MEV 40.1–00013741–79:2012 [10].

7. Late comments on individual provisions of the 2011 stress test report by State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine by several researchers [6, 9].

Originality and Practical value

For the first time, a comprehensive analysis of the facility's condition was conducted, based both on its own research materials and on available data from third-party organizations. Given the current situation and today's realities, the need for large-scale additional research on the facility was confirmed. This includes, among other things, the Program for assessing the technical condition of the

cooling pond dam, developed by the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, utilizing its own innovative methods. Additionally, expanded research on the hydraulic structures of the NPP should become part of new stress tests of the NPP site, conducted under the auspices of the IAEA and, considering the strategic importance of the facility, must meet all the fundamental requirements of this organization [12, 14, 15, 17].

Conclusions

The conclusions based on the results of the analysis of all available materials on the dam of the cooling pond of the Zaporizhzhia NPP are as follows:

- the facility is significant for ensuring safety and should be given primary attention;
- the data for preparing the stress tests were based entirely on the materials of geotechnical research conducted, apparently, before 2000, and could not take into account further developments of the situation;
- the 2011 stress tests did not consider the condition of the soil for the structure at all, which was largely unknown in most parts of this facility before 2011. Since the main engineering and geological surveys, including the most informative dynamic probing, were conducted later and only in parts, and in many areas, especially on the side of the Kakhovka Reservoir, the condition of the soils remains unknown;
- given the condition of the soils, even a short-term increase in the level of the Kakhovka Reservoir to 19.36 m is sufficient to destroy the structure, since more than 85% of its area will be underwater, albeit possibly for a short time. Which will lead to the sloughing of the bank slopes, the destruction of the channel lining, the failure of the sluice gates, the change in the position of large-diameter pressure pipelines, the filling of spray pools, channels with sand, etc.;
- regarding the parameters of the Kakhovka Reservoir's water level increase, it is unclear which

time of year the calculations refer to. The presence of a thick ice cover during winter could also alter these parameters in terms of both timing and altitude plans.

- the presence of powerful deep foundations of cooling towers and a pumping station on the dam, as well as the planning mark of the main block site located at a distance of 22.0 m from the hydraulic structures, which exceeds the flood level of 19.36 m, cannot in any way influence the development of the situation with the dam soils;
- the assessment of the structure's condition based on stress tests from 2011 appears overly optimistic due to the lowered level of the Kakhovka Reservoir. It also failed to consider the actual state of the soils, as later researchers pointed out.
- in general, the soils of the structure, due to engineering-geological and technological features, are especially sensitive to any kind of external impacts, including vibration. Which can ultimately harm the condition of the entire structure as a whole, given its dimensions and location;
- for the above reasons, any measurement of the position of the Kakhovka Reservoir mirror is undesirable due to the destruction of the hydraulic structures located above and below;
- the data from the stress tests of the NPP site from 2011 were most likely based exclusively on internal sources of information without access to the funds of closed organizations located outside the country (in particular, such as «Gidrospegeologiya», «Hydrogeological Expedition of the 16th District», etc.);
- all of the above, in turn, is the basis for conducting additional extended research on the hydraulic structures of the NPP;
- extended research on the hydraulic structures of the Zaporizhzhia NPP and, first of all, the dam of the cooling pond, in turn, should become part of new stress tests of the NPP site, conducted under the auspices of the IAEA.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонова Л. Н., Канюк Г. И., Погонина Т. Е., Михайский Д. М., Омельченко Л. Н., Фокина А. Н. Назначение и особенности условий работы водоёмов-охладителей тепловых и атомных электростанций. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 2/10(56). С. 56–63.
2. Бабич А. В., Вовк Н. И. Особенности гидрохимического и термического режимов водоема-охладителя Запорожской АЭС. *Проблемы зооинженерии и ветеринарной медицины*. 2011. Вып. 1. С. 313–319.
3. Бронников В. К., Верховецкий Н. А., Назипов Р. М., Барабашов С. В., Васильев А. Н., Гаврилюк Н. А., Осадчий В. И. *Запорожская АЭС и окружающая среда*. Харьков : Издательство «Харьков», 1994. 100 с.
4. *Государственная инспекция ядерного регулирования Украины. Национальный отчет о результатах проведения «стресс-тестов»*. Киев, 2011. 136 с. URL: <https://snriu.gov.ua/storage/app/uploads/public/5ed/0e1/545/5ed0e1545f03c241500484.pdf>
5. Громов Г. В., Дыбач А. М., Зелёный О. В., Инюшев В. В., Носовский А. В., Шоломицкий С. Э., Шугайло А-й. П., Гашев М. Х., Бойчук В. С. Результаты экспертной оценки стресс-тестов энергоблоков АЭС Украины с учётом уроков аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2012. № 1(53). С. 3–9. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1\(53\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1(53).01)
6. Козлов И. Л. *Совершенствование теоретических и методологических основ анализа безопасности АЭС при маловероятных аварийных событиях с катастрофическими последствиями* : дисс. ... док. тех. наук. Одесса, 2016. 314 с.
7. Косач Н. И., Бейнер Н. В. Анализ эффективности охладительных устройств в оборотных системах водоснабжения АЭС. *Метрологія – 2014*. Харків, 2014. С. 231–234.
8. Седін В. Л., Ульянов В. Ю., Ковба В. В., Горлач С. М., Загільський В. А. Морфологічні особливості еолово-алювіальних пісків м. Энергодар. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1(013). С. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.280223.92.923>
9. Скалозубов В. И., Богодист В. В., Козлов И. Л., Габлая Т. В., Кочнева В. Ю. Метод оценки критериев затопления промплощадки Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2013. № 4(60). С. 16–19. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000133551>
10. *СОУ-Н МЕВ 40.1-00013741-79:2012. Настанова з проведення спостережень за осіданням фундаментів, деформаціями конструкцій будівель і споруд та режимом підземних вод на майданчиках теплових та атомних електростанцій*. [Чинний від 2013-03-27]. Київ, 2013. 85 с
11. Сухов А. К., Мороз Н. А. Проблемы эксплуатации прудов-охладителей АЭС в перспективе развития ядерной энергетики Украины. *Зб. наук. пр. ШУУЯЕ та П*. 2011. Вып. 2(38). С. 130–137.
12. Abubakar Tadda M., Ahsan A., Imteaz M., Shitu A., Abdulkaki Danhassan U., Idris Muhammad A. *Operation and Maintenance of Hydraulic Structures. Hydraulic Structures – Theory and Applications*. 2020. 80 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.91949>
13. *ENGINEERING EVALUATION ASSESSMENT*. 2016. 175 p. URL: <https://mtu.gov.ua/files/USACereport.pdf>
14. Khan M., Awan M. U. F., Lal K., Gulab M., Ahmed S., Ahmed Z. Role of In-Service Inspections in Nuclear Power Plants (NPPs). *The Nucleus*. 2023. Vol. 60, Iss. 1. P. 86–97. DOI: <https://doi.org/10.71330/nucleus.60.01.1266>
15. Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine: Summary Report by the Director General, 24 February – 28 April 2022. Ukraine. *ReliefWeb*. URL: <https://reliefweb.int/report/ukraine/nuclear-safety-security-and-safeguards-ukraine-summary-report-director-general-24-february-28-april-2022>
16. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine : 2nd Summary Report by the Director General*. IAEA, Vienna, 2022. 52 p. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/ukraine-2ndsummaryreport_sept2022.pdf
17. Ulianov V. Y., Bilyk V. V. Research Results of the Earth Dam Condition of Cooling Pond of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant. *Science and Transport Progress*. 2022. No 2(98). P. 86–99. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/2679393>

В. Ю. УЛЬЯНОВ^{1*}, В. В. БІЛИК^{2*}^{1*}Незалежний експерт, ел. пошта uluanovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408^{2*}Лабораторія досліджень атомних і теплових електростанцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, ел. пошта kolemasakar@gmail.com, ORCID 0000-0002-4435-2388

Про необхідність проведення додаткових стрес-тестів для оцінки безпеки гідротехнічних споруд на території Запорізької АЕС

Мета. Провести комплексний аналіз стану греблі охолоджувального басейну Запорізької атомної електростанції (АЕС), яка є ключовим компонентом системи гідротехнічних споруд на цій АЕС, для обґрунтування подальших досліджень. Крім того, виявлення будь-яких додаткових або раніше не врахованих факторів, які можуть вплинути на загальну безпеку споруди. **Методика.** Автори провели комплексний огляд усіх доступних інженерних обстежень та геотехнічних дослідницьких матеріалів, пов'язаних із греблею охолоджувального басейну Запорізької АЕС. Ці матеріали були підготовлені різними організаціями, починаючи з моменту завершення будівництва об'єкта в 1985 році, з особливим акцентом на період 2011–2018 років, особливо після публікації звіту про стрес-тести 2011 року. Особлива увага була приділена високоточним геодезичним даним про осідання та деформації укосів греблі охолоджувального басейну. Це дозволило по-новому поглянути на результати інженерно-геологічних досліджень, а також стрес-тестів, проведених на їх основі. **Результати.** На основі аналізу даних досліджень ґрунтів тіла греблі були підняті та розглянуті раніше не розглянуті питання, в тому числі ті, що стосуються експлуатації об'єкта. Була обґрунтована необхідність проведення нових стрес-тестів з урахуванням поточних умов на території АЕС та в її околицях. **Практична значимість.** Вперше було проведено комплексний аналіз стану об'єкта на основі накопичених геотехнічних даних. Стрес-тести, проведені в 2011 році, були визнані надто оптимістичними. **Наукова новизна.** Була обґрунтована необхідність подальших досліджень об'єкта, в тому числі за допомогою програми оцінки технічного стану греблі охолоджувального басейну з використанням інноваційних методів Придніпровської державної академії цивільного будівництва та архітектури.

Ключові слова: Запорізька АЕС; гребля охолоджувального басейну; алювіальні піски; розрідження ґрунту; динамічна нестабільність; осідання; повзучість схилів

REFERENCE

1. Antonova, L. N., Kanyuk, G. I., Pogonina, T. Ye., Mikhayskiy, D. M., Omelchenko, L. N., & Fokina, A. N. (2012). Naznachenie i osobennosti usloviy raboty vodoemov-okhladiteley teplovykh i atomnykh elektrostantsiy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10(56), 56–63. (in Russian)
2. Babich, A. V., & Vovk, N. I. (2011). Osobennosti gidrokhimicheskogo i termicheskogo rezhimov vodoema-okhladitelya Zaporozhskoy AES. *Problemy zoonzhenerii i veterinarnoy meditsiny*, 1, 313–319. (in Russian)
3. Bronnikov, V. K., Verkhovetskiy, N. A., Nazipov, R. M., Barabashov, S. V., Vasilev, A. N., Gavriilyuk, N. A., & Osadchiy, V. I. (1994). *Zaporozhskaya AES i okruzhayushchaya sreda*. Kharkov: Izdatelstvo «Kharkov». (in Russian)
4. Gosudarstvennaya inspektsiya yadernogo regulirovaniya Ukrainy. *Natsionalnyy otchet o rezultatakh provedeniya «stress-testov»*. (2011). Kiev. Retrieved from <https://snriu.gov.ua/storage/app/uploads/public/5ed/0e1/545/5ed0e1545f03c241500484.pdf> (in Russian)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

5. Gromov, G., Dybach, A., Zelenyi, O., Inyushev, V., Nosovsky, A., Sholomitsky, S., Shugailo, A., Gashev, M., & Boichuk, V. (2012). Rezultaty ekspertnoy otsenki stress-testov energoblokov AES Ukrainy s uchetom urokov avarii na AES «Fukusima-1» v Yaponii. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(53), 3-9. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1\(53\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1(53).01) (in Russian)
6. Kozlov, I. L. (2016). *Sovershenstvovanie teoreticheskikh i metodologicheskikh osnov analiza bezopasnosti AES pri maloveroyatnykh avariynykh sobytiyakh s katastroficheskimi posledstviyami* (PhD dissertation). Odessa, Ukraine. (in Russian)
7. Kosach, N. I., & Beiner, N. V. (2014). Analiz effektivnosti okhladitelnykh ustroystv v oborotnykh sistemakh vodosnabzheniya AES. In *Metrolohiia – 2014* (pp. 231-234). Kharkiv, Ukraine. (in Russian)
8. Sedin, V., Ulyanov, V., Kovba, V., Horlach, S., & Zahilskyi, V. (2023). Morphological features of eolian and alluvial sands of energodar city. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(013), 92-101. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.280223.92.923> (in Ukrainian)
9. Skalozubov, V. I., Bogodist, V. V., Kozlov, I. L., Gablaya, T. V., & Kochneva, V. Yu. (2013). Metod otsenki kriteriev zatopeniya promplohchadki Zaporozhskoy AES pri zaproektnykh zemletryasenyakh. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 4(60), 16-19. Retrieved from <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000133551> (in Russian)
10. *Nastanova z provedennia sposterezhen za osidanniam fundamentiv, deformatsiiamy konstruksii budivel i sporud ta rezhymom pidzemnykh vod na maidanchykakh teplovykh ta atomnykh elektrostantsii, 85 SOU-N MEV 40.1-00013741-79:2012*. (2013). (in Ukrainian)
11. Sukhov, A. K., & Moroz N. A. Problemy ekspluatatsii prudov-okhladiteley AES v perspektive razvitiya yadernoy energetiki Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats' SNUYaE ta P.*, 2(38), 130-137.
12. Abubakar Tadda, M., Ahsan, A., Imteaz, M., Shitu, A., Abdulbaki Danhassan, U., & Idris Muhammad, A. (2020). *Operation and Maintenance of Hydraulic Structures. Hydraulic Structures – Theory and Applications*. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.91949> (in English)
13. *ENGINEERING EVALUATION ASSESSMENT*. (2016). Retrieved from <https://mtu.gov.ua/files/USACE-report.pdf> (in English)
14. Khan, M., Awan, M. U. F., Lal, K., Gulab, M., Ahmed, S., & Ahmed, Z. (2023). Role of In-Service Inspections in Nuclear Power Plants (NPPs). *The Nucleus*. 60(1), 86-97. DOI: <https://doi.org/10.71330/nucleus.60.01.1266>
15. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine: Summary Report by the Director General*. (2022, February-April). Ukraine. *ReliefWeb*. Retrieved from <https://reliefweb.int/report/ukraine/nuclear-safety-security-and-safeguards-ukraine-summary-report-director-general-24-february-28-april-2022> (in English)
16. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine: 2nd Summary Report by the Director General*. (2022). IAEA, Vienna. Retrieved from https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/ukraine-2ndsummaryreport_sept2022.pdf (in English)
17. Ulianov, V. Y., & Bilyk, V. V. (2022). Research Results of the Earth Dam Condition of Cooling Pond of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant. *Science and Transport Progress*, 2(98), 86-99. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267939> (in English)

Надійшла до редколегії: 30.07.2025

Прийнята до друку: 15.12.2025

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТ

УДК 629.33.083-843:669.018

В. В. КРІВДА¹, І. Г. ОЛШЕВСЬКИЙ², В. Є. ОЛШЕВСЬКА^{3*}

¹Каф. автомобільного транспорту, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 92 08 080, ел. пошта krivda.v.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-8304-2016

²Каф. безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 36 68 875, ел. пошта Olishevskiy.I.H@nmu.one, ORCID 0000-0001-8573-3366

^{3*}Каф. автомобільного транспорту, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 36 68 845, ел. пошта olishevsk.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

Блок циліндрів і гільзи циліндрів двигунів внутрішнього згорання: матеріали і особливості дефектування при ремонті

Мета. Основною метою роботи є огляд і систематизація матеріалів і дефектів блоку циліндрів та гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), а також аналіз проблем і сучасних тенденцій дефектування при ремонті. **Методика.** До основних проблем, які сьогодні пов'язані з дефектуванням блоку циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ, можна віднести наступні: швидке зростання рівня автомобілізації країни, що призводить до збільшення кількості блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ, які потребують дефектування; використання ручної праці, що робить процес дефектування трудомістким та дорогим; потреба класифікації типів дефектів і їх автоматичного розпізнавання; врахування впливу робочих умов на розвиток дефектів; потреба використання нових процесів дефектування; потреба кількісної оцінки зносу і прогнозу залишкового ресурсу деталей; адаптація методів дефектування й критеріїв оцінки для нових матеріалів. В роботі використані наступні методи дослідження: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз та узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження). **Результати.** Авторами проведено огляд і систематизацію конструкційних матеріалів і основних дефектів блоку циліндрів та гільзи циліндрів ДВЗ. Виявлено основні проблеми сучасного дефектування: недостатня автоматизація процесів; низька точність візуальних та інструментальних методів; обмежена адаптація існуючих методів дефектування до нових матеріалів; потреба у кількісній оцінці залишкового ресурсу деталей. Визначено тенденції розвитку систем дефектування, що полягають у переході до автоматизованих і комп'ютеризованих технологій дефектування, створенні баз даних типових дефектів і розробленні алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу деталей. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу конструкційних матеріалів, дефектів і сучасних тенденцій дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ. Систематизовано матеріали для виготовлення деталей, запропоновано класифікацію дефектів, визначено фактори, що впливають на інтенсивність зносу та утворення дефектів. Встановлено тенденції розвитку дефектування в напрямку автоматизації, підвищення чутливості та точності контролю. **Практична значимість.** Проведений аналіз дозволяє підвищити ефективність процесів дефектування та ремонту блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ, створювати інформаційні бази даних типових дефектів та умов їхнього виникнення.

Ключові слова: дефектування; ремонт; блок циліндрів; гільза циліндра; матеріали блока циліндра; матеріали гільзи циліндра; дефекти

Вступ

Сучасний автомобільний транспорт працює на двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ). Кількість автомобілів в світі, які працюють на ДВЗ, складає 99,8 %, і, на думку авторів роботи [18] така тенденція буде зберігатися до 2040 року.

В Україні експлуатується велика кількість транспортних засобів – понад 9,2 млн, серед яких технічна та (або) моральна застарілість охоплює майже 70 % рухомого складу, а кількість автомобілів, експлуатованих понад 10 років, становить 83 % [9].

Основними деталями ДВЗ, від технічного стану яких залежать потужність, економічність, надійність і довговічність двигуна, є блок циліндрів і гільзи циліндрів.

Ресурс роботи ДВЗ залежить від довговічності деталей циліндропоршневої групи двигуна на 70...90 %.

Інтенсифікація режимів роботи сучасних ДВЗ, використання нових видів палива та підвищення вимог до екологічних показників призводять до зростання навантажень і термічних напружень у блоку циліндрів і гільзах. Це зумовлює появу нових типів дефектів, мікротріщин, зносу поверхонь гільз, деформацій та ін. Саме ці деталі, внаслідок зношування раніше, ніж інші, досягають граничних розмірів і вимагають обов'язкового відновлення при капітальному ремонті.

Зношування поверхні гільзи, утворення задирів, тріщин та інших дефектів у процесі експлуатації двигуна потребує якісного дефектування й ефективного відновлення. Зношення або пошкодження гільз призводить до зниження компресії, підвищення витрат мастильного матеріалу та зменшення потужності двигуна. Заміна гільз при ремонті двигунів щорічно вимагає значних витрат, оскільки повторно без відновлення можна використати тільки 11 % гільз.

Сучасний рівень розвитку автомобільного транспорту вимагає високоефективних методів ремонту і дефектування. Але сьогодні виявлення дефектів і оцінка якості блоку циліндрів і гільз циліндра переважно залежить від ручної праці людини, що робить технологічний процес дефектування трудомістким та дорогим.

Підвищення ефективності перевірки технічного стану блоків циліндрів і гільз потребує за-

стосування сучасних технологічних рішень, зокрема вдосконалення технологічного процесу дефектування.

Мета

Метою роботи є огляд і систематизація матеріалів і дефектів блоку циліндрів та гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), а також аналіз проблем і сучасних тенденцій дефектування при ремонті.

Методика

До основних проблем, які сьогодні виникають при дефектуванні циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ, можна віднести наступні:

– швидке зростання рівня автомобілізації нашої країни, що призводить до суттєвого збільшення кількості циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ, які потребують дефектування;

– виконання дефектування органолептичними й інструментальними методами, що потребує ручної праці людини, залежить від кваліфікації спеціаліста, робить технологічний процес дефектування трудомістким та дорогим;

– питання класифікації типів дефектів і їх автоматизації, що дозволить розрізняти дефекти;

– залежність розвитку дефектів в матеріалах блоку циліндрів і гільз від робочих умов (температури, тиску, моторної оливи, параметрів двигуна), що потребує розробки сучасних моделей;

– своєчасність і надійність виявлення різних дефектів, що потребує підвищення чутливості методів дефектування;

– необхідність автоматизації технологічного процесу дефектування;

– потреба використання нових технологічних процесів дефектування, наприклад, ультразвукового дефектування, використання вихрових струмів, 3D-сканування або комбінації методів;

– потреба не тільки якісної, але й кількісної оцінки зносу і прогнозу залишкового ресурсу циліндрів і гільз;

– впровадження нових матеріалів і технологій обробки деталей: композиційних матеріалів, наноматеріалів, обробки поверхонь деталей лазерним променем, плазмовим напиленням та ін., потребує адаптації методів дефектування й критеріїв оцінки.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Вирішення проблем дефектування блоку циліндрів і гільз циліндрів є важливим і актуальним, тому що дозволить вирішувати задачі прогнозування терміну безвідмовної роботи та усунення серйозних поломок, знизити витрати на капітальний ремонт двигуна, забезпечити належний технічний рівень відновлених деталей і продовжити строк служби двигуна взагалі.

В роботі використані наступні методи дослідження: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз та узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження).

Результати

Дефектування блоку циліндрів і гільз циліндрів. Дефектування деталей – це технологічний процес оцінки технічного стану шляхом порівняння фактичних показників з даними технічної документації та з подальшим сортуванням на групи [2, 10].

Метою дефектування деталей є визначення технічного стану під час надходження автомобілів та агрегатів на ремонті та виявлення всіх дефектів, які можуть вплинути на надійність та довговічність деталей при їхній роботі до наступного капітального ремонту.

Технічний стан можна визначити як сукупність схильних до зміни в процесі виробництва чи експлуатації якостей виробу, яка характеризується в певний момент часу ознаками, встановленими технічною документацією на цей виріб [13].

При аналізі технічного стану визначаються конструктивні елементи деталей, які підлягають дефектуванню:

- блок циліндрів: стінки оболонки охолодження та верхнього картера, різьбові отвори під шпильки кріплення головки блоку;
- гільза циліндрів: отвір під поршень, посадочна поверхня.

Для кожного конструктивного елемента, що підлягає дефектуванню, визначають технологічні параметри: точність розміру, форми та розташування; шорсткість поверхні; ремонтні розміри; розміри, які допустимі без ремонту.

Для контролю якості і визначення технічного стану деталей під час дефектування при ремонті необхідні документація (технічні умови на дефектування, креслення деталей) і контрольно-вимірвальні інструменти:

- лінійка масштабна;
- штангенциркуль ШЦ–II–250–0,05;
- мікрометри МК–100 і МК–125;
- індикаторний нутромір НІ–160;
- різьбова калібр-пробка М11–6Н;
- калібр-пробка НЕ 25,04 мм.

Технічні вимоги на дефектування складають на підставі аналізу умов роботи деталі, її фізико-механічних властивостей та інших показників. В технологічних картах на дефектування вказують основні відомості про деталь, її матеріал та твердість, термічну обробку, а також можливі дефекти, способи їх виявлення, номінальні і граничні розміри та ін. [2].

Наявність дефекту деталі виявляється шляхом порівняння фактичних (вимірних або визначених іншими методами) та нормативних значень параметрів стану, що вказані в технічній документації (технічних умовах, робочих кресленнях деталі та ін.) [6].

Конструктивно-технологічна характеристика деталей. Блок циліндрів відноситься до класу «товстостінних корпусних деталей» і є складною корпусною деталлю, яка забезпечує конструктивну жорсткість двигуна.

Основними конструктивними елементами блоку циліндрів є стінки оболонки охолодження, посадочні отвори під втулки розподільного вала, посадочні отвори під гільзу, гнізда під вкладиші корінних підшипників, поверхні прилягання до головки блоку, кришки розподільних шестерень, картера зчеплення та ін. [11].

Матеріалом блока циліндрів можуть бути сірі чавуни (наприклад, сірий чавун марок СЧ150, СЧ250), леговані чавуни, алюмінієві сплави (наприклад, АЛ4) та інші сплави [3, 7].

Гільзи циліндрів ДВЗ, які відносяться до класу «порожніх циліндрів», створюють, разом з поршнем та головкою блока, камеру згорання, спрямовують рух поршня та відводять тепло [10].

Гільзи циліндрів ДВЗ поділяються на два основні типи – сухі та мокрі, в залежності від наявності їхнього безпосереднього контакту з охолоджувальною рідиною.

Сухі гільзи не мають прямого контакту з охолоджувальною рідиною, встановлюються в корпус блоку з щільною посадкою. Такі гільзи відзначаються простішою конструкцією, нижчою

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

вартістю виготовлення та забезпечують вищу жорсткість блока.

Для їх виробництва зазвичай використовують сірий або легований чавун, інколи – сталь. У легких двигунах застосовують алюмінієві сплави з чавунними вставками, що дозволяє зменшити масу конструкції.

Мокрі гільзи безпосередньо контактують з охолоджувальною рідиною двигуна, що забезпечує ефективніше відведення тепла від робочих поверхонь циліндрів. Їх виготовляють із високоміцного або легovanого чавуну, іноді з нанесенням зміцненого робочого шару для підвищення зносостійкості.

Конструктивними елементами гільзи циліндрів ДВЗ є дзеркало циліндра, посадочні пояски, канавки для ущільнювальних кілець, отвір під поршень, зовнішня поверхня, борт (рис. 1) [11, 12].

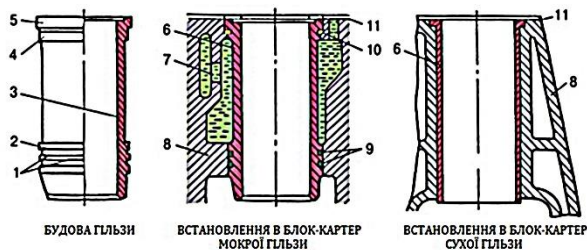


Рис. 1. Будова гільзи циліндра та оточуючі деталі:

- 1 – канавки для ущільнюючих кілець;
- 2, 4 – посадочні пояски; 3 – внутрішня поверхня (дзеркало) циліндра; 5 – борт; 6 – гільза циліндра;
- 7 – зона охолодження; 8 – картер-блок;
- 9 – кільце ущільнююче; 10 – кільце із міді;
- 11 – прокладка головки блока циліндрів

Fig. 1. Structure of the cylinder liner and surrounding components:

- 1 – grooves for sealing rings; 2, 4 – locating collars;
- 3 – inner surface (cylinder mirror); 5 – flange;
- 6 – cylinder liner; 7 – cooling zone; 8 – crankcase block;
- 9 – sealing ring; 10 – copper ring; 11 – cylinder head gasket

Геометричними параметрами гільзи циліндра ДВЗ є:

- внутрішній діаметр;
- зовнішній діаметр;
- довжина [12].

Робоча поверхня гільзи циліндра ДВЗ повинна характеризуватися стабільністю форми, високими механічними та трибологічними властивостями, оптимальною шорсткістю, а також

стійкістю до вібрацій і навантажень, що виникають під час роботи двигуна.

Досягнення зазначених вимог забезпечується вибором відповідного матеріалу гільзи, раціональною технологією її виготовлення та застосуванням методів зміцнення робочої поверхні [5].

Гільзи циліндрів ДВЗ виготовляють з різних матеріалів, в тому числі з чавунів (наприклад, СЧ200), сталей (наприклад, 38ХМЮА), кераміки або полімерних сплавів [3, 7, 12].

Гільзи можуть бути виготовлені із сірого чавуну, а іноді вони мають вставку у верхній частині з легovanого чавуну [10].

Структура низьколегованого чавуну в гільзах, отриманих литтям у піщано-глинистих формах, є перлітною з невеликою кількістю фериту (до 5 %) і середньопластинчатим графітом. Матеріал гільз циліндрів, отриманих методом відцентрового лиття (наприклад, вироблених фірмою GKN (Великобританія), споживачами продукції якої є фірми країн Західної Європи і Америки: Volvo, Scania, Ford, Jaguar та інші, Teves-Thompson (США), Renault (Франція) та ін.), мають однорідну дрібнозернисту структуру [5]. Але серйозним недоліком таких чавунів є ліквідація фосфору (P), сірки (S) і кремнію (Si) біля зовнішньої поверхні гільзи, внаслідок чого зменшується твердість внутрішньої робочої поверхні гільзи, можливе поверхневе відбілювання чавуну.

Для виробництва гільз циліндрів використовують також фосфористі чавуни, але найбільший ефект в підвищенні надійності матеріалу дає комплексне легування чавуну Cr, Ni, Mo, Cu [5].

Чавуни отримали широке розповсюдження для виробництва гільз тому, що графітові включення сприяють утриманню мастильного матеріалу, добре піддаються текстуруванню поверхні (наприклад, хонінгуванням, лазерною обробкою).

Виробництво гільз циліндрів ДВЗ з легovanих сталей, наприклад, сталей 40Х, 40ХН, 38ХМЮА, дозволяє отримати високі міцність, твердість, термостійкість, дає можливість наплавлення зносостійких шарів.

Сучасні ДВЗ розвиваються в напрямку збільшення тиску та меншої ваги, їхні конструкції повинні бути більш компактними; таким чином,

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

товщина стінок гільз циліндрів зменшується. Однак інтенсивні вібрації в гільзі циліндрів можуть призвести до кавітації охолоджувальної рідини, що створює значну проблему надійності ДВЗ [21].

Проблема покращення стійкості до кавітації може бути вирішена створенням додаткового поверхневого покриття.

Автори роботи [21] провели дослідження гільз з покриттям Ni–P (ENP), яке було термічно оброблене. Запропоноване покриття дозволило збільшити мікротвердість поверхні на 65,8 % [21].

Сьогодні активно досліджуються також алюмінієві сплави з покриттями. Алюмінієві сплави системи Al–Si легкі, мають хорошу теплопровідність, забезпечують добре охолодження, дозволяють зменшити масу двигуна [19].

Гільзи з покриттям Ni–SiC (алюмінієва основа, покриття Ni + SiC (5...10%)) забезпечують високу зносостійкість, низький коефіцієнт тертя.

Композитні матеріали (наприклад, Al–Si + SiC, Al–graphite) мають великий потенціал, але висока вартість і складність обробки обмежують їх застосування [19].

Перспективними матеріалами для виробництва гільз циліндрів ДВЗ є композити і наноматеріали, які можуть забезпечити високу надійність і довговічність при меншій вазі, але їх практичне використання для широкого виробництва гільз потребує подальших досліджень.

Вибір матеріалу для виробництва гільз циліндрів ДВЗ має велике значення, тому що впливає на знос, тертя, теплопровідність і стійкість гільз до деформацій.

Вид і характер дефектів деталей. В процесі роботи двигуна блок циліндрів та гільзи піддаються дії різноманітних інтенсивних навантажень: механічних, теплових, хімічних, кавітаційних, вібраційних та ін.

Це призводить до зносу, відхилення розташування: непаралельності, неперпендикулярності та ін., відхилення від форми, порушення якості поверхні (задирам, рискам, корозії), механічних пошкоджень (тріщин, відколів, дефектів різьб) [4].

Під час експлуатації в блоку циліндрів з'являються дефекти:

- знос циліндрів;
- тріщини і пробоїни;
- знос клапанних гнізд;
- знос направляючих втулок клапанів і што-вхачів;
- руйнування різьби в кріпильних отворах (рис. 2) [10–12].

a – a



б – б



в – в



г – г



Рис. 2. Дефекти блока циліндрів:

- a* – руйнування перемички між циліндрами;
- б* – пробоїна стінки блока; *в* – руйнування циліндра;
- г* – тріщина на верхній площині блока

Fig. 2. Defects of the cylinder block:

- a* – destruction of the partition between the cylinders;
- b* – hole in the block wall; *c* – destruction of the cylinder;
- d* – crack on the upper surface of the block

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

На рис. 3 показані види зношування гільз циліндрів ДВЗ [5].



Рис. 3. Види зношування гільз циліндрів

Fig. 3. Types of cylinder liner wear

Дефектами гільз циліндрів ДВЗ є:

- знос внутрішньої поверхні;
- знос зовнішньої поверхні;
- знос посадкових місць гільзи;
- тріщини на поверхні гільзи;
- руйнування бурту (рис. 4) [5, 11, 14].

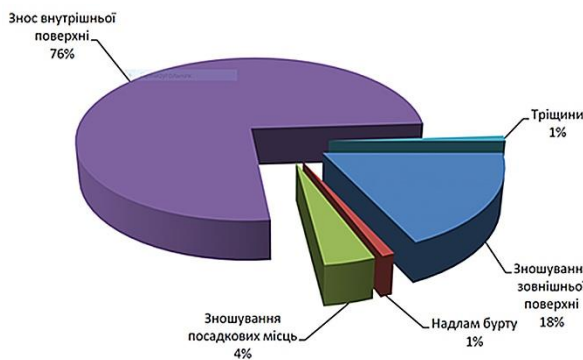


Рис. 4. Основні дефекти гільзи

Fig. 4. Main defects of the cylinder liner

Знос внутрішньої поверхні (дзеркала гільзи) відноситься до основних дефектів гільз.

В результаті зносу внутрішньої робочої поверхні гільзи циліндра, її профіль набуває вигляду, що наведений на рис. 5 [2]. Діаметр робочої поверхні гільзи змінюється нерівномірно: циліндрична форма по довжині робочої частини перетворюється в неправильний конус, а по циліндричності – в овал [6]. Найбільший знос гільзи циліндрів спостерігається в зоні верхнього компресійного кільця. Причиною появи овальності гільзи служить нерівномірний тиск поршня на її стінки в період робочого ходу. У площині хитання шатунна тиск поршня на стінки циліндра значно більше, ніж вздовж осі циліндра, тому і зношування в цій площині вище.

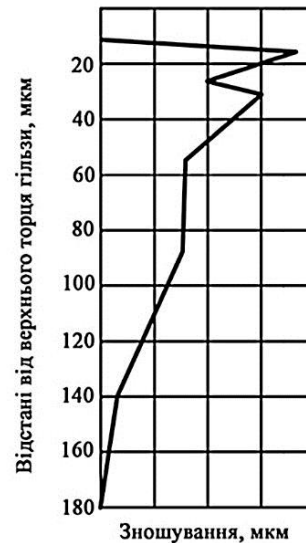


Рис. 5. Знос гільзи циліндрів у зоні робочого ходу поршня

Fig. 5 Wear of the cylinder liner in the piston stroke zone

Абразивний знос внутрішньої робочої поверхні гільзи відбувається в результаті механічного тертя при потраплянні в двигун пилу (рис. 6, а, б) [4, 11, 14].

Аномальний знос гільзи циліндра серйозно впливає на надійність та термін служби ДВЗ, а вивчення стану зносу гільз циліндрів в умовах експлуатації має велике інженерне значення [5].

Основною ознакою дефекту зовнішньої поверхні гільзи є кавітаційний знос, який з'являється в результаті контакту зовнішньої стінки гільзи блоку циліндрів з охолоджуючою рідиною і вібрації гільзи (рис. 6, в).

До зносу посадкових поясків приводить сильна вібрація (рис. 6, г).

Надлом бурта гільзи може виникати з різних причин:

- потрапляння між гільзою блоку циліндра й буртом сторонніх часточок (залишків прокладочних матеріалів, бруду та ін.);
- відсутності торцевої кромки (фаски) поверхні бурту;
- перекосу в опорі бурту;
- невідповідності за розмірами прокладки для головки блоку;
- відсутності вирівнювання або очищення вогнетривкої кромки на головці циліндра;
- порушення процесу оброблювання при ремонті гільзи (рис. 6, е).

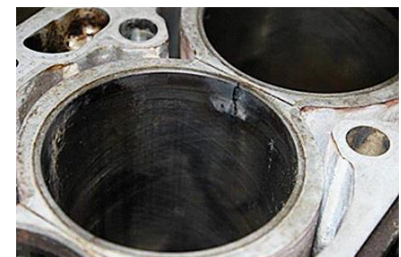
a – a*г – д**б – б**д – е**в – в**е – ф*

Рис. 6. Дефекти гільзи блоку циліндрів:

a – задирка дзеркала; *б* – спрацювання дзеркала;
в – кавітаційні пошкодження; *г* – знос посадкових поясків; *д* – тріщини на поверхні гільзи; *е* – надлом бурту

Fig. 6 Cylinder block liner defects:

a – scoring of the surface; *b* – wear of the surface;
c – cavitation damage; *d* – wear of the seating bands;
e – cracks on the liner surface; *f* – fracture of the flange

Визначення технічного стану конструктивних елементів деталей, що дефектуються. Перевірка технічного стану виконується поетапно.

Перший етап визначення технічного стану конструктивних елементів деталей – зовнішній огляд, який відноситься до органолептичних методів оцінки технічного стану деталей і виконується за допомогою органів почуття.

Зовнішній огляд дозволяє встановити наявність вибраковочних дефектів оболонки охолодження та верхнього картера, а при їх відсутності – місця розташування і характер (довжина, площа, глибина та ін.) тріщин, відколів, рисок, подряпин та інших видимих дефектів.

Гільзи циліндрів вибраковують при наявності тріщин або зломів, кавітаційному наскрізному руйнуванні стінок, граничному спрацю-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ванню гільз, раніше розточених на останній ремонтний розмір [1].

Якщо дефектування деталей органолептичними методами показало, що в деталях відсутні неприпустимі дефекти, тоді дефектування виконують інструментальними методами за допомогою спеціальних інструментів, пристосувань, приладів та устаткування. Інструментальні методи дозволяють виявити дефекти, що пов'язані з порушенням взаємного розташування базових поверхонь і фізико-механічними властивостями матеріалу деталей, а також визначити дійсні розміри і форми базових поверхонь деталей.

При визначенні технічного стану конструктивних елементів блоку циліндрів інструментальними методами необхідно:

- визначити стан різьби в отворах під шпильки кріплення головки циліндрів, для чого потрібно вкрутити по черзі в різьбові отвори калібр-пробку різьбову М11–6Н. Калібр-пробка повинна щільно вкручуватися в отвір. Погойдування і осьове переміщення калібр-пробки свідчать про знос різьби в отворі та необхідність ремонтних впливів;

- визначити стан отворів під штовхачі, що досягається введенням калібр-пробки в отвори під штовхачі. Якщо калібр проходить (НЕ 25,04 мм) крізь отвори під штовхачі, то отвори потребують ремонтних впливів.

Визначення технічного стану конструктивних елементів гільзи циліндрів інструментальними методами включає наступні етапи:

1. Вимірювання довжини гільзи, вимірювання індикаторним нутроміром діаметру отвору кожної гільзи в трьох поясах I–I, II–II, III–III та двох взаємно перпендикулярних площинах А–А та Б–Б (рис. 7).

Перший пояс вимірювання I–I розташований на відстані 10...15 мм нижче верхнього краю гільзи, другий пояс II–II – посередині, третій пояс III–III – на відстані 20 мм вище нижнього краю. Одна площина вимірювання гільзи паралельна осі колінчатого вала, а друга – перпендикулярна першій.

Перед вимірюванням отвору гільзи, індикаторний нутромір необхідно встановити на базовий розмір, яким є найбільший розмір отвору, що вимірюється.

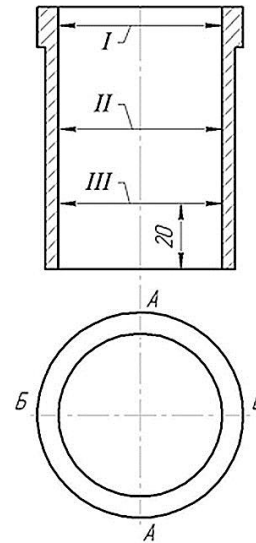


Рис. 7. Схема вимірювання гільзи циліндрів двигуна індикаторним нутроміром:
I, II, III – пояси вимірювання;
А-А, Б-Б – площини вимірювання

Fig. 7. Diagram of measuring the engine cylinder liner with a dial bore gauge:
I, II, III – measurement zones;
А-А, Б-Б – measurement planes

Встановлення індикаторного нутроміра на базовий розмір здійснюється в наступній послідовності:

- виміряти отвір гільзи штангенциркулем; базовим є найбільший цілий розмір (наприклад, якщо діаметр отвору дорівнює 100,65 мм, тоді базовим розміром буде 101,0 мм);

- встановити на мікрометрі базовий розмір (попередньо перевірити правильність його установки на «0»);

- встановити відповідну вимірювальну вставку у вимірювальну головку індикаторного нутроміра;

- ввести вимірювальну головку нутроміра між п'ятою та гвинтом встановленого мікрометра та, повертаючи циферблат індикатора, поєднати «0» зі стрілкою; це положення буде відповідати базовому розміру.

Вимірювання проводять методом погойдування (рис. 8).

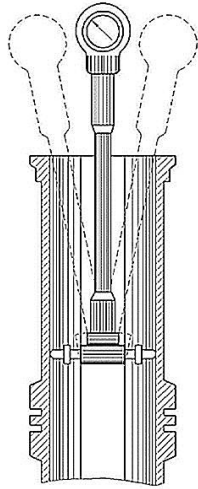


Рис. 8. Визначення спрацювання гільзи індикаторним нутромір

Fig. 8. Determination of cylinder liner wear using a dial bore gauge

2. Розрахунок величини загального зносу ($Z_{заг}$) за формулою:

$$Z_{заг} = D_3 - D_n,$$

де D_3 – найбільше значення діаметра всіх гільз даного блоку (використовувати величину з найбільшим зносом), мм; D_n – діаметр гільзи до експлуатації (найбільший граничний розмір за робочим або ремонтним кресленням), мм.

3. Розрахунок величини одностороннього нерівномірного зносу ($Z_{нерів}$) за формулою:

$$Z_{нерів} = \beta \cdot Z_{заг},$$

де β – коефіцієнт нерівномірності зносу, який дорівнює 0,6 [4].

4. Розрахунок нециліндричності поверхонь – овальності ($\Delta_{ов}$) та конусоподібності ($\Delta_{конус}$).

Овальність визначається як різниця розмірів, виміряних в одному поясі, але в різних взаємно перпендикулярних площинах (рис. 6). Для кожної гільзи потрібно отримати три значення овальності:

$$\Delta_{овI-I} = D_{A-AI-I} - D_{B-BI-I},$$

$$\Delta_{овII-II} = D_{A-AII-II} - D_{B-BII-II},$$

$$\Delta_{овIII-III} = D_{A-AIII-III} - D_{B-BIII-III}.$$

Конусоподібність визначається як різниця розмірів, вимірюваних в одній площині, але в різних поясах (рис. 6). Для кожної гільзи отримати два значення конусоподібності:

$$\Delta_{конусA-A} = D_{max A-A} - D_{min A-A},$$

$$\Delta_{конусB-B} = D_{max B-B} - D_{min B-B}.$$

Дефектування гільзи необхідно проводити по найбільшим значенням.

5. Розрахунок розміру обробки отвору (D_p) за формулою:

$$D_p = D_3 + Z_{нерів} + 2Z,$$

де D_3 – найбільше значення діаметра всіх гільз даного блоку (використовувати величину з найбільшим зносом), мм; $Z_{нерів}$ – величина одностороннього нерівномірного зносу, мм; Z – мінімальний односторонній припуск на обробку (для розточування та хонінгування $2Z_p$ дорівнює 0,150 мм) [4, 6].

Далі потрібно зробити порівняння величини D_p із значеннями категорійних ремонтних розмірів D_{pp} та призначити категорію ремонтного розміру одну для всіх гільз (обрати більшу категорію РР):

$$D_{pp} \geq D_p.$$

6. Вимірювання мікрометром діаметру посадочної поверхні гільз в одному поясі (посередині) і двох взаємно перпендикулярних площинах.

На підставі виконаних вимірювань та розрахунків визначають технічний стан поверхонь деталей.

Сортування деталей за результатами контролю. Для прийняття рішення відносно подальшого використання деталей керуються нормативно-технічними документами для даного виду та об'єкту ремонту.

В нормативних документах (технічних вимогах) зазначено два види оціночних параметрів технічного стану деталей:

– критерій допустимості подальшого використання деталі, який забезпечує ресурс до наступного ремонту;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– критерій граничного стану, за якого деталь не може бути встановлена на автомобіль; таку деталь ремонтують (відновлюють), якщо це технічно можливо та економічно доцільно, або замінюють новою (запасною) деталлю.

Допустимим є такий знос деталі, при якому деталь, встановлена після капітального ремонту без ремонтного впливу, надійно працює до наступного капітального ремонту.

Причинами вибракування деталей може бути граничний та аварійний знос, при появі яких подальша експлуатація деталей стає неможливою.

Граничним є такий знос деталі, при якому вона не може бути використана без відновлення або повинна бути замінена на нову.

В результаті дефектування та сортування, деталі можуть бути розділені на три групи:

1) придатні деталі, якщо всі розміри відповідають технічним вимогам (характер і величина зносу знаходяться в межах, що допускаються технічними умовами);

2) непридатні деталі, якщо є непоправний дефект (тріщина, деформація тощо);

3) відновлювані деталі, якщо в деталі є дефекти, що підлягають відновленню згідно технічної документації [2].

Для деталей, які пройшли перевірку технічного стану, необхідно порівняти дійсний стан параметрів конструктивних елементів деталей з технічними вимогами та записати категорію стану деталі: «Без ремонту», «В ремонт», «Брак».

Для деталей категорії «В ремонт» потрібно призначити спосіб ремонту та зміст операцій для усунення дефектів.

Знос, механічні та корозійні пошкодження усувають обробкою деталей під ремонтний розмір (РР) або постановкою додаткових ремонтних деталей (ДРД), зварюванням в середовищі аргону, а також синтетичними матеріалами.

Деформації різного характеру усувають слюсарно-механічною обробкою.

Проблеми і актуальні питання дефектування гільзи циліндра ДВЗ. Сьогодні дефектування гільзи циліндра ДВЗ і виявлення її якості виконується спеціалістами вручну з виконанням візуального огляду, використанням штангенциркуля, мікрометра, індикаторного нутроміра, вимірюванням розмірів. Але залежність переві-

рки технічного стану гільзи від ручної праці робить процес трудомістким та дорогим.

Крім того, при дефектуванні традиційними методами важко своєчасно і надійно виявляти різні дефекти, наприклад, тріщини, які проходять етапи розвитку від субмікротріщини до мікротріщини і далі – до тріщини; корозію; задири; кавітацію; знос. Ці проблеми потребують підвищення чутливості методів дефектування без демонтажу.

В роботі [18] з метою автоматизації процесу запропоновано новий підхід до виявлення дефектів гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння. Автори створили нову базу зображень дефектних гільз (до 1 000 зображень) для навчання та тестування трансформерної моделі з механізмом поділу на блоки та маскуванням для точного виявлення дефектів. Запропонована модель показала високу точність і ефективність у порівнянні з традиційними методами.

Традиційні методи часто не задовольняють сучасним вимогам надійного безруйнівного дефектування внутрішньої поверхні гільзи. Для вирішення проблеми потрібно використовувати інші методи дефектування, наприклад, ультразвукове дефектування, використання вихрових струмів, 3D-сканування або комбінацію методів.

Автори роботи [15] з метою підвищити точність і ефективність контролю якості на виробництві представили інноваційний підхід до автоматичного виявлення дефектів гільз циліндрів, зокрема задилок, які важко виявити традиційними методами.

Гільза циліндра є однією з важливих частин двигуна. Якість гільзи циліндра безпосередньо впливає на безпеку та енергоспоживання двигуна. Більшість розмірних перевірок гільзи циліндра автоматизована, але перевірка поверхневих дефектів все ще виконується великою кількістю персоналу [15]. В останні роки дослідники почали використовувати технологію виявлення зображень для визначення поверхневих дефектів, але ефект виявлення все ще не отримав широкого застосування в промисловості. У статті [15] досліджується гільза циліндра з задирками, яка також є складною при перевірці поверхні гільзи циліндра. Поверхневі дефекти гільзи циліндра, такі як ямки, шлакові включення, залишки, грубі задирки, рідкі задирки. У цій статті в основному досліджується виявлення поверхневих дефектів

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

гільзи циліндра на основі 3D-зору [15]. Експерименти показують, що цей метод успішно реалізує автоматичне виявлення поверхні гільзи циліндра та застосовується в промисловій галузі.

Запропонований підхід зменшує потребу в ручному огляді, економить час і ресурси, підвищує надійність продукції і може бути інтегрований у реальні виробничі лінії для безперервного контролю якості [15].

На розвиток дефектів (наприклад, кавітацію, термічні втомні тріщини) та надійність дефектування впливає нестаціонарність робочих умов – температури, тиску, моторної оливи, параметрів двигуна. Тому необхідні моделі, що враховують експлуатаційні умови.

Карта зносу може безпосередньо відображати стан зносу та механізм пари тертя за різних умов і широко використовується для прогнозування зносу та діагностики несправностей сталевих матеріалів. В роботі [20] складена карта зносу гільзи циліндра двигуна та її матеріалів. Робочі параметри були отримані за допомогою стендових випробувань двигуна, а в якості параметрів випробувань на знос були обрані параметри поблизу верхньої мертвої точки гільзи циліндра (ВМТ). Аналізуючи зміну швидкості зносу за різних параметрів випробувань, стан зносу гільзи циліндра був розділений на легкий, середній та сильний знос [20]. Морфологію поверхні плями зносу та поперечний переріз гільзи циліндра аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM), а потім побудували карту механізму зносу. Результати показали, що основним механізмом зносу при незначному зносі є відколи, що супроводжуються явищем пластичної деформації. Зношування від розшарування є основним механізмом у стані середнього зносу, що супроводжується невеликою кількістю масового відшарування. Зношування відшарування головним чином спричинене тріщиною, що утворюється графітом у шарі деформації або під ним. Основним механізмом зносу у стані сильного зносу є масове відшарування. Графіт відіграє роль первинних тріщин, що призводить до відшарування шару пластичної деформації [20]. Авторами була створена карта зношування, яка дозволяє візуалізувати області високого ризику зносу при різних режимах роботи. Виявлено, що зміна швидкості та навантаження суттєво впливає на тип

і інтенсивність зношування. Карта може бути використана для оптимізації конструкції двигуна та вибору мастильних матеріалів.

Актуальними питаннями дефектування гільз є питання класифікації типів дефектів і автоматизації, що дозволить відрізнити поверхневі забруднення від ерозійного зносу чи тріщин. Потрібні алгоритми, що дають не тільки висновок «є/немає», а й визначають тип, розмір і ступінь критичності дефектів. Рішення проблеми можливо на основі комп'ютерного зору і глибокого навчання (deep-learning).

В роботі [16] розроблено метод та систему виявлення дефектів поверхні гільзи циліндра на основі глибокого навчання. Спочатку було створено систему виявлення дефектів машинного зору на основі причин та типів дефектів гільзи циліндра. Потім було запропоновано метод розширення набору даних, заснований на автоматичному вилученні області інтересу, що ефективно збільшує кількість зразків. Далі було розроблено метод автоматичного розширення області дефектів за допомогою XML-файлу, що покращило здатність виявляти невеликі дефекти. Результати досліджень показали, що точність виявлення дефектів піску, подряпин та зносу склала 77,5 %, 70 % та 66,3 %, відповідно, що покращило результати щонайменше на 26,3 % у порівнянні з традиційними методами дефектування [16].

Сучасний розвиток технології дефектування потребує не тільки якісної, але й кількісної оцінки зносу і прогнозу залишкового ресурсу. Іншими словами, потрібно не тільки виявити дефект, а й кількісно оцінити швидкість зносу і прогнозувати момент відмови. Тут потрібні моделі зношування та моніторинг в реальному часі.

В роботі [17] виконана оцінка надійності зносу компонентів поршневих кілець та гільз циліндрів на основі ймовірнісного картування. Автори спочатку створили модель для зразків та компонентів (поршневе кільце-гільза циліндра, PRCL) з використанням удосконаленої моделі зносу, моделі прискорення та характеристик розподілу зносу. Потім автори виконали дослідження ступені впливу температури, навантаження та часу на величину зносу за допомогою аналізу чутливості, і оптимізували модель зносу компонентів. Крім того, в роботі запропоновано

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

підхід на основі ймовірного відображення для розгляду трьох співвідношень відображення. Модель зносу зразка та співвідношення відображення використано для прогнозування глибини зносу, терміну служби та надійності зносу компонентів, які потім були порівняні з експериментальними результатами. Запропонований авторами підхід може слугувати керівництвом для планового технічного обслуговування та оцінки якості компонентів гільз циліндрів – поршневих кілець [17].

Традиційні методи дефектування повинні враховувати, що сучасні технології ремонту (плазмове/термічне напилення, нанесення покриттів, термопластичне деформування, хонінгування) змінюють мікрорельєф і властивості поверхні, та вимагають адаптації методів дефектування й критеріїв оцінки.

Перспективні напрями розвитку технології дефектування. Зробити процес дефектування гільзи циліндра ДВЗ більш надійним, точним, менш трудомістким та дорогим можна шляхом автоматизації процесу і використання інформаційних технологій, штучного інтелекту.

Актуальні напрями розвитку технології дефектування включають:

- машинний зір і навчання для автоматичного дефектування й класифікації дефектів із камер, 3D-сканів;
- гібридні NDT-системи – поєднання ультразвуку, вихрових струмів, 3D-сканування і спектральних методів для підвищення достовірності перевірки технічного стану гільзи; гібридні NDT-системи (Non-Destructive Testing, методи безруйнівного контролю) дозволяють поєднувати два або більше методів контролю або інтегрують класичні методи з сучасними технологіями, такими як штучний інтелект, машинне навчання, нейронні мережі тощо;
- кількісний аналіз процесу зносу і карти зношування (wear maps), що потребує лабораторних і чисельних досліджень, в результаті яких отримують карти режимів зносу при різних навантаженнях, швидкостях, мастильних умовах;
- моделювання контактної триботехніки (пара «поршень–кільце–гільза») з фізичними моделями (тертя, гідродинамічна олива, термомеханіка) для передбачення появи дефектів;
- розробка стандартів оцінки при дефекту-

ванні поверхонь, які отримані новими технологіями (наприклад, покриттів, що знижують кавітаційне руйнування і знос);

- стандартизовані датасети і методики верифікації – відкриті бази дефектів для тренування ML-моделей, стандарти оцінки точності систем дефектування та ін.

Перспективні напрями розвитку технології дефектування мають велике значення для автомобільної промисловості, оскільки дозволяють:

- підвищити надійність і довговічність двигунів;
- зменшити витрати на обслуговування і ремонт;
- покращити екологічні показники за рахунок зниження втрат енергії через тертя.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу конструкційних матеріалів, дефектів і сучасних тенденцій дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ.

Авторами роботи:

- систематизовано сучасні конструкційні матеріали, які застосовуються для виготовлення блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ;
- запропоновано класифікацію основних дефектів блоків циліндрів і гільз циліндрів за характером виникнення, причинами та зонами поширення;
- визначено основні фактори, що впливають на інтенсивність зносу та утворення дефектів у різних умовах роботи двигуна;
- узагальнено сучасні методи дефектування і встановлено тенденції їхнього розвитку в напрямку автоматизації, підвищення чутливості та точності контролю;
- підкреслена необхідність адаптації методів дефектування до нових матеріалів блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ для підвищення достовірності оцінки технічного стану деталей.

Практична значимість проведеного дослідження полягає у можливості використання результатів для підвищення ефективності процесів дефектування та ремонту блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ.

Систематизація матеріалів і типових дефектів дозволяє оптимізувати технологічні процеси

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

дефектування, зменшити трудомісткість і вартість робіт, а також підвищити точність визначення технічного стану деталей.

Отримані в роботі результати можуть бути використані з метою:

- розробки методичних рекомендацій з дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ;
- впровадження дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ в умовах автотранспортних підприємств;
- вдосконалення навчальних матеріалів для підготовки бакалаврів спеціальності І8 «Автомобільний транспорт»;
- створення інформаційних баз даних типових дефектів блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ та умов їхнього виникнення;
- розробки програм автоматизації процесів дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ та прогнозування залишкового ресурсу деталей.

Висновки

В роботі проведено огляд і систематизацію конструкційних матеріалів, з яких виготовляються блоки циліндрів та гільзи циліндрів ДВЗ.

Широко використовують сірі і леговані чавуни, леговані сталі та алюмінієві сплави з високою термостійкістю і зносостійкістю.

Встановлено, що вибір матеріалу для виготовлення блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ суттєво впливає на довговічність, надійність і ремонтпридатність деталей.

Проведено аналіз дефектів блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ – тріщин, задирів, раковин, корозійних пошкоджень, деформацій та зносу

поверхонь і причин їх виникнення. Визначено характерні зони виникнення дефектів та фактори, що сприяють їхнього розвитку.

Виявлено основні проблеми сучасного дефектування:

- недостатня автоматизація процесів;
- низька точність візуальних та інструментальних методів;
- обмежена адаптація існуючих методів дефектування до нових матеріалів;
- потреба у кількісній оцінці залишкового ресурсу деталей.

Підвищити точність результатів дефектування дозволяють неруйнівні методи контролю (ультразвуковий, магнітопорошковий та ін.).

Визначено тенденції розвитку систем дефектування, що полягають у переході до автоматизованих і комп'ютеризованих технологій дефектування, створенні баз даних типових дефектів і алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу деталей.

Результати дослідження можуть бути використані у виробничій та навчальній діяльності, при розробленні рекомендацій з удосконалення технологічних процесів дефектування та ремонту деталей циліндропоршневої групи ДВЗ.

Отримані результати поглиблюють наукові уявлення про процеси пошкодження та дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ і створюють теоретичну основу для вдосконалення технологій дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ автомобілів.

Результати роботи сприяють підвищенню якості дефектування блоків циліндрів і гільз циліндрів ДВЗ, підвищенню надійності і довговічності двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бивалькевич Л. М., Люлька В. С. Основи надійності і довговічності транспортних машин : навч.-метод. посіб. з практичних робіт. Чернігів : НУЧК імені Т. Г. Шевченка, 2019. 120 с.
2. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Левкович М. Г., Сташків М. Я., Сіправська М. Д. Основи технології виробництва і ремонту автомобілів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.
3. ДСТУ 8833:2019. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 11 с.
4. Митко М. В., Шиліна О. П., Цимбал С. В. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів. Організація самостійної та практичної роботи : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2022. 98 с.
URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/35995>

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Мордванюк С. А. *Удосконалення технології ремонту гільз циліндрів автомобільних двигунів високотемпературним зміцненням* : магістерська робота. Вінниця : ВНАУ, 2018. 116 с.
URL: <https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/15854.pdf>
6. Олішевська В. Є., Бас К. М., Кривда В. В. *Основи технології виробництва та ремонту автомобілів. Практикум* : навч. посіб. Дніпро : НТУ «ДП», 2025. 223 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985>
7. Олішевська В. Є. *Конструкційні та експлуатаційні матеріали в автомобільній галузі* : метод. рекомендації до виконання індивідуальних робіт. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 44 с.
URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152194>
8. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С., Іванова Г. П. Металеві конструкційні матеріали для виробництва і ремонту деталей автомобілів: практика та перспективи. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 3(111). С. 111–129. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197>
9. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Обґрунтування раціонального рухомого складу підприємства в умовах переходу до електромобілів. *Автошляховик України*. 2024. № 2. С. 35–44.
DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44>
10. Пікула М. В. *Основи технології виробництва та ремонту автомобілів. Конспект лекцій* : навч.-метод. посіб. Рівне : НУВГП, 2024. 203 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/28916/1/Пікула_конспект%20_ОТВРА_14_09_23.pdf
11. Пікула М. В. *Основи технології виробництва та ремонту автомобілів* : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт. Рівне : НУВГП, 2020. 26 с.
12. Пожарнюк Д. В. Розроблення технологічного процесу відновлення гільзи циліндра двигуна 6510-102021 автомобіля КрАЗ-6510 : бакалаврська дипломна робота. Тернопіль : ТНТУ, 2023. 61 с.
URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42324>
13. Про затвердження "Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту" : Наказ М-ва трансп. України від 30.03.1998 № 102.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text>
14. Пузереї А. О. *Підвищення післяремонтної довговічності гільз циліндрів дизельних двигунів* : магістерська дипломна робота. Дніпро, 2022. 77 с. URL: <https://dSPACE.dsau.dp.ua/handle/123456789/7622>
15. Chen Y., Yu L., Zhang Z. Surface defect detection of burr cylinder liner based on 3D vision. *4th International Conference on Image Processing and Intelligent Control (IPIC 2024)*. (Kuala Lumpur, Malaysia, 10–12 May 2024). 2024. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3038553>
16. Gao C., Hao F., Song J., Chen R., Wang F., Liu B. Cylinder Liner Defect Detection and Classification based on Deep Learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol. 13, Iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2022.0130818>
17. Guo P., Xu J., Yan Z., Huang R. Wear Reliability Assessment of Piston Ring and Cylinder Liner Components Based on Probability Mapping. *Journal of Tribology*. 2025. Vol. 147, Iss. 10. 101701.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4067974>
18. Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*. 2020. Vol. 1. 100005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
19. Liu Q., Huang X., Shao X., Hao F. Industrial cylinder liner defect detection using a transformer with a block division and mask mechanism. *Scientific Reports*. 2022. № 12. 10689.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14971-8>
20. Pawlus P., Koszela W., Reizer R. Surface Texturing of Cylinder Liners: A Review. *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 23. 8629. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238629>
21. Zhang B., Ma X., Liu L., Yu H., Morina A., Lu X. Study on the sliding wear map of cylinder liner – piston ring based on various operating parameters. *Tribology International*. 2023. Vol. 186. 108632.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108632>
22. Zhang W., Gao H., Wang Q., Liu D., Zhang E. Strengthening the Cavitation Resistance of Cylinder Liners Using Surface Treatment with Electroless Ni-P (ENP) Plating and High-Temperature Heat Treatment. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 5. 1087. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18051087>

V. V. KRIVDA¹, I. H. OLISHEVSKIY², V. E. OLISHEVSKA^{3*}¹Dep. of Motor Vehicle Transport, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 92 08 080, e-mail krivda.v.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-8304-2016²Dep. of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 875, e-mail Olishevskiy.I.H@nmu.one, ORCID 0000-0001-8573-3366^{3*}Dep. of Motor Vehicle Transport, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail olishevskav.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

Cylinder Block and Cylinder Liners of Internal Combustion Engines: Materials and Features of Defect Detection During Repair

Purpose. The main goal of this study is to review and systematize the materials and defects of the cylinder block and cylinder liners of internal combustion engines (ICE), as well as to analyze the issues and current trends in defect detection during repair. **Methodology.** The main problems currently associated with the defect detection of cylinder blocks and liners of ICEs include the following: the rapid growth of motorization, which leads to an increase in the number of cylinder blocks and liners requiring defect inspection; the use of manual labor, which makes the defect detection process labor-intensive and costly; the need for classification of defect types and their automatic recognition; the consideration of operating conditions influencing defect development; the necessity of implementing new defect detection processes; the need for quantitative wear assessment and prediction of component residual life; the adaptation of inspection methods and evaluation criteria to new materials. The study employs the following research methods: theoretical analysis (classification, systematization), review and synthesis of known scientific results, and empirical methods (comparison, observation). **Findings.** The authors conducted a review and systematization of structural materials and the main defects of cylinder blocks and liners of ICEs. The main issues in modern defect detection were identified as follows: insufficient process automation, low accuracy of visual and instrumental inspection methods, limited adaptability of existing inspection techniques to new materials, and the need for quantitative evaluation of component residual life. The development trends in defect detection systems are defined as the transition to automated and computerized inspection technologies, the creation of databases of typical defects, and the development of algorithms for predicting the residual life of components. **Originality.** The scientific novelty of this work lies in a comprehensive approach to analyzing structural materials, defects, and modern trends in defect detection of cylinder blocks and liners of ICEs. Materials used in component manufacturing have been systematized, a defect classification has been proposed, and the factors influencing wear intensity and defect formation have been identified. The trends in the development of defect detection systems have been established toward automation, increased sensitivity, and higher inspection accuracy. **Practical value.** The conducted analysis contributes to improving the efficiency of defect detection and repair processes of cylinder blocks and liners of ICEs, as well as to the development of informational databases of typical defects and the conditions under which they occur.

Keywords: defect detection; repair; cylinder block, cylinder liner, cylinder block materials; cylinder liner materials; defects

REFERENCES

1. Byvalkevych, L. M., & Liulka, V. S. (2019). *Osnovy nadiinosti i dovhovichnosti transportnykh mashyn*. Chernihiv, Ukraine: NUTsH imeni T. H. Shevchenka. (in Ukrainian)
2. Hevko, I. B., Rohatynskiy, R. M., Liashuk, O. L., Hud, V. Z., Levkovich, M. H., Stashkiv, M. Ya., & Sipravska, M. D. (2021). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva i remontu avtomobiliv*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuia. (in Ukrainian)
3. *Vylyvky iz siroho chavunu z plastychnastym hrafitom. Zahalni tekhnichni umovy, 11 DSTU 8833:2019*. (2019). (in Ukrainian)
4. Mytko, M. V., Shylina, O. P., & Tsymbal, S. V. (2022). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Orhanizatsiia samostiinoi ta praktychnoi roboty*. Vinnytsia, Ukraine: VNTU. Retrieved from <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/35995> (in Ukrainian)
5. Mordvaniuk, S. A. (2018). *Udoskonalennia tekhnologii remontu hilz tsylindriv avtomobilnykh dvyhuniv vysokotemperaturnym zmitsnenniam*. Vinnytsia, Ukraine: VNAU. Retrieved from <https://socrtes.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/15854.pdf> (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

6. Olishevskaya, V. E., Bas, K. M., & Kryvda, V. V. (2025). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv: Praktykum*. Dnipro, Ukraine: NTU «DP». Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985> (in Ukrainian)
7. Olishevskaya, V. E. (2018). *Konstruksiini ta ekspluatatsiini materialy v avtomobilnii haluzi*. Dnipro, Ukraine: NTU «DP». Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152194> (in Ukrainian)
8. Olishevskaya, V. E., Olishevskiy, H. S., & Ivanova, H. P. (2025). Metal Structural Materials for the Production and Repair of Automobile Parts: Practice and Prospects. *Science and Transport Progress*, 3(111), 111-129. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197> (in Ukrainian)
9. Olishevskaya, V. E., & Olishevskiy, H. S. (2024). Substantiation of rational rolling stock of an enterprise in the conditions of transition to electric vehicles. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, 2, 35-44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44> (in Ukrainian)
10. Pikula, M. V. (2024). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Konspekt leksii*. Rivne, Ukraine: NUVHP. Retrieved from https://ep3.nuwm.edu.ua/28916/1/Пікула_конспект%20_ОТВРА_14_09_23.pdf (in Ukrainian)
11. Pikula, M. V. (2020). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv*. Rivne, Ukraine: NUVHP. (in Ukrainian)
12. Pozharniuk, D. V. (2023). *Rozroblennia tekhnolohichnoho protsesu vidnovlennia hilzy tsylindra dvyhuna 6510-102021 avtomobilia KrAZ-6510*. Ternopil, Ukraine: TNTU. Retrieved from <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42324> (in Ukrainian)
13. Ministerstvo transportu Ukrainy. (1998). Pro zatverdzhennia "Polozhennia pro tekhnichne obsluhovuvannia i remont dorozhnykh transpo-rtnykh zasobiv avtomobilnoho transportu". Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text> (in Ukrainian)
14. Puzerei, A. O. (2022). *Pidvyshchennia pisliaremontnoi dovhovichnosti hilz tsylindriv dyzelnykh dvyhuniv*. Dnipro, Ukraine. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7622> (in Ukrainian)
15. Chen, Y., Yu, L., & Zhang, Z. (2024, May). Surface defect detection of burr cylinder liner based on 3D vision. In *4th International Conference on Image Processing and Intelligent Control (IPIC 2024)*. Kuala Lumpur, Malaysia. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3038553> (in English)
16. Gao, C., Hao, F., Song, J., Chen, R., Wang, F., & Liu, B. (2022). Cylinder liner defect detection and classification based on deep learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(8). DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130818> (in English)
17. Guo, P., Xu, J., Yan, Z., & Huang, R. (2025). Wear reliability assessment of piston ring and cylinder liner components based on probability mapping. *Journal of Tribology*, 147(10), 101701. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4067974> (in English)
18. Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1, 100005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005> (in English)
19. Liu, Q., Huang, X., Shao, X., & Hao, F. (2022). Industrial cylinder liner defect detection using a transformer with a block division and mask mechanism. *Scientific Reports*, 12, 10689. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14971-8> (in English)
20. Pawlus, P., Koszela, W., & Reizer, R. (2022). Surface Texturing of Cylinder Liners: A Review. *Materials*, 15(23), 8629. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238629> (in English)
21. Zhang, B., Ma, X., Liu, L., Yu, H., Morina, A., & Lu, X. (2023). Study on the sliding wear map of cylinder liner–piston ring based on various operating parameters. *Tribology International*, 186, 108632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108632> (in English)
22. Zhang, W., Gao, H., Wang, Q., Liu, D., & Zhang, E. (2025). Strengthening the cavitation resistance of cylinder liners using surface treatment with electroless Ni–P (ENP) plating and high-temperature heat treatment. *Materials*, 18(5), 1087. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18051087> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.08.2025

Прийнята до друку: 17.12.2025

УДК 629.33.083:621.892.8

В. Є. ОЛШЕВСЬКА^{1*}, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ², Г. П. ІВАНОВА³

^{1*}Каф. автомобільного транспорту, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 36 68 845, ел. пошта olishevskav.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

²Каф. електроенергетики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 56 51 830, ел. пошта, olishevskiy.h.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

³Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

Дослідження інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів

Мета. Основною метою роботи є дослідження впливу інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів на структуру і властивості поверхонь тертя деталей й можливий механізм взаємодії матеріалів в трибосполученнях. **Методика.** В роботі використані наступні методи дослідження: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз та узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження), експериментальні дослідження (металографічний аналіз, випробування на мікротвердість, зносостійкість, вимірювання шорсткості поверхні). **Результати.** Запропоновані інноваційні матеріали на основі серпентинітів. В основу розробки покладено ідеї використання матеріалів нового покоління та управління процесами, що відбуваються в зоні контакту пар тертя для підвищення зносостійкості та довговічності трибосполучень. Проведені експериментальні дослідження механізму взаємодії інноваційних матеріалів зі сталлю 40XH в умовах тертя, які показали, що твердість та зносостійкість поверхневого шару збільшуються у 3 і 4 рази, відповідно, а шорсткість контактних поверхонь зменшується у 6 разів. Компоненти інноваційних матеріалів дифундують у поверхневі шари матеріалу поверхонь тертя та утворюють металокерамічні шари, що являють собою розчини компонентів досліджених матеріалів у фазових складових сталі 40XH. Запропоновані інноваційні матеріали дозволяють не тільки знизити знос поверхонь тертя, але й відновити функціональний стан зношених поверхонь без припинення експлуатації механізмів. **Наукова новизна.** Обґрунтовано використання інноваційних матеріалів для запобігання зносу та відновлення функціонального стану поверхонь тертя деталей автомобілів. Встановлено механізм дії інноваційних матеріалів, який полягає в спрямованій іонній дифузії компонентів спеціального трибологічного складу. Досліджено механічні і експлуатаційні властивості сталі 40XH та встановлено, що підвищення твердості контактних поверхонь у поєднанні з низькою шорсткістю призводить до виникнення унікального антифрикційного ефекту. **Практична значимість.** Проведені дослідження процесів зносу та утворення зносостійких шарів в умовах дії інноваційних матеріалів дозволяють сформулювати умови обробки поверхонь тертя для зниження зносу, зміцнення поверхонь, відновлення функціонального стану зношених поверхонь без зупинки експлуатації механізмів. Розроблено технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів у вузли тертя, що дозволяє отримувати якісні зносостійкі шари на поверхнях пар тертя.

Ключові слова: інноваційні матеріали; пара тертя; мікроструктура; твердість; шорсткість; зносостійкість; відновлення поверхонь тертя

Вступ

Важливим завданням автомобільного транспорту є забезпечення якісного та безпечного його функціонування.

Характеристикою, яка суттєво впливає на ефективність використання автомобільного транспорту та надійність транспортних засобів, є технічний стан автомобілів [10].

В процесі роботи автомобіля показники його технічного стану змінюються від початкових,

що відповідають новому автомобілю, до гранично допустимих, а потім і до граничних значень, при яких подальше застосування за призначенням неприпустиме або недоцільне [10].

Основною причиною, що викликає зміну технічного стану, є знос деталей, вузлів, агрегатів і систем автомобіля [1, 10, 13].

В сучасних автомобілях велика кількість деталей, які працюють в умовах тертя, наприклад, деталі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Сьогодні 99,8 % автомобільного транспорту

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

в світі працює на ДВЗ. Автори роботи [24] висловлюють думку, що, незважаючи на розвиток електромобілів і гібридів, 85...90 % транспортної енергії буде надходити від звичайного рідкого палива, яке приводить у дію ДВЗ, до 2040 року.

Значення проблеми зносу та її масштаби характеризують також наступні цифри: у типовому легковому автомобілі близько 79 % енергії витрачається на подолання тертя та втрати; витрати на подолання тертя поглинають до третини енергії, що виробляється в світі; через знос вузлів трибосполучень відбувається до 80 % механічних поломок [1, 30].

Проблеми зносу деталей, вузлів, агрегатів і систем автомобілів надзвичайно актуальні і для України. Автомобільний транспорт в Україні нараховує понад 9,2 млн транспортних засобів, у тому числі 6,9 млн легкових автомобілів, близько 250 тис. автобусів, 1,3 млн вантажних автомобілів, понад 840 тис. одиниць мототранспорту [12]. Крім того, функціонування автомобільного транспорту в Україні має свої особливості, серед яких технічна та (або) моральна застарілість майже 70 відсотків рухомого складу; середній вік парку легкових автомобілів в Україні сягає 22,7 років, що у два рази перевищує цей показник в Європейському Союзі (ЄС) – приблизно 11,5 років; кількість автомобілів, які експлуатуються понад 10 років, становить 83 % [12].

Зношування деталей, вузлів, агрегатів та систем автомобіля приводить до руйнування поверхонь сполучених деталей, порушення їх первісних геометричних форм, об'ємів, ваг [1, 8, 9, 12, 15].

Крім того, зміна технічного стану автомобілів, що відбувається в результаті тертя, призводить до зростання питомих витрат на запасні частини, технічне обслуговування та ремонт [1, 15]. У ремонтних роботах, які погано піддаються механізації та автоматизації, зайнята приблизно десята частина робочої сили високої кваліфікації.

Наведені дані демонструють значення і розміри проблеми зношування деталей і вузлів автомобілів та їх наслідки.

Сьогодні існує велика кількість способів підвищення зносостійкості деталей автомобілів, наприклад, термічна обробка, поверхневий на-

клеп, легування та ін. Проблеми зношування деталей автомобілів успішно вирішуються застосуванням мастильних матеріалів, які містять традиційні присадки (органічні фосфати, органічні сульфіди, органічні металеві сполуки та ін.) [7–9, 11, 17, 27].

Але перелічені методи впливу на процеси тертя і зменшення зношування деталей автомобілів часто є недостатньо ефективними, при високих матеріальних та енергетичних витратах.

Перспективним напрямом вирішення проблем зношування деталей автомобілів є безрозбірний сервіс (Smart self Technology) – новий напрям у технології ремонту автомобілів, який є комплексом робіт з технічного обслуговування і поточного ремонту вузлів та механізмів без проведення розбирально-складальних робіт із застосуванням нових мастильних матеріалів.

З цією метою активно досліджуються наноприсадки до мастильних матеріалів:

- на основі металів (металеві, оксидні, сульфідні тощо);
- на основі вуглецю (графен, нанотрубки, фулерен, наноалмази);
- нанокompозитні системи [18, 20, 21, 23, 29, 30].

За останні роки зросла кількість досліджень магній-силікатних сполук і природних силікатних мінералів в якості трибоприсадок.

Дослідження впливу присадок до мастильних матеріалів на поверхні тертя і трибологічні характеристики пари тертя «сталь – сталь», які проведені в роботі [26], показали, що в результаті обробки відбувається зміна структури сталі і підвищення мікротвердості. Результати підтверджують припущення про утворення керамічної (сервовітної) плівки, яка має значно більший запас пластичності порівняно з поверхнею з оксидною плівкою, що зазвичай присутня на поверхні при терті з мастильним матеріалом без присадки.

Автори роботи [25] провели дослідження мастильних матеріалів на основі нано-SiO₂. Тестування мастильних матеріалів з різною концентрацією присадок: 0,5 мас. %, 1,5 мас. %, 2,5 мас. %, 3,5 мас. % та 4,5 мас.% нано-SiO₂ показали, що мастильний матеріал з 3,5 мас. % нано-SiO₂ дозволяє зменшити втрати від зношення деталей, в середньому, на 42,43 %.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В роботі [19] проведено дослідження трибологічних властивостей суміші нано-гідроксиду силікату магнію (MSH) та мікровуглецевих сфер (CS). Авторами доведено, що розкладання MSH є ключем до прояву синергетичного протизношувального ефекту з аморфним вуглецем (а-С). Результати показали, що протони H^+ , що вивільняються в результаті розкладання MSH, можуть ефективно перетворювати Fe_2O_3 на Fe_3O_4 на зношених поверхнях деталей.

Дослідження трибологічної поведінки нанокомпозитів MSH/MoS₂ показало, що антифрикційні характеристики і зносостійкість поверхонь тертя покращуються на 44,8 % і 41,2 %, відповідно [22]. Отримані результати автори пояснюють утворенням міцної двошарової трибоплівки, верхній шар якої містить велику кількість MoS₂, що забезпечує добрі антифрикційні властивості, тоді як сусідній шар, який складається з MSH, продуктів реакції мастильної присадки та металу, забезпечує стабільність першого шару.

У роботі [28] досліджено композити з політетрафторетиленової матрицею (PTFE) з двофазним армуванням на основі антигориту та воластоніту. Результати показали, що порівняно з додаванням моноантигориту або воластоніту, композити, отримані шляхом одночасного наповнення двох мінералів, продемонстрували чудові трибологічні властивості: середній коефіцієнт тертя та об'єм зносу композитів (10Atg + 20Wl)/PTFE зменшилися на 44,2 % та 71,4 %, відповідно, у порівнянні з чистим PTFE. Під час процесу тертя на зношених поверхнях як двофазно армованих PTFE матричних композитів, так і відповідних сталевих кульок утворилася суцільна трибоплівка, що складається переважно з SiO₂, MgSiO₃, Mg₂SiO₄, MgO, CaO, CaMg(SiO₃)₂ та CaF₂ [28]. Зменшення тертя та зносу пояснюється армуючим ефектом мінералів на PTFE матрицю, а також складними фізичними та хімічними реакціями на межі тертя, стимульованими синергетичними ефектами між двома мінералами.

Проведений огляд наукових джерел показує, що одним із перспективних шляхів вирішення проблеми зносу деталей автомобілів в умовах економічної кризи і дефіциту ресурсів є розробка нових інноваційних присадок до мастильних матеріалів, а дослідження зміни поверхонь і їх властивостей є актуальною науково-технічною задачею.

Мета

Метою роботи є дослідження впливу інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів на структуру і властивості поверхонь тертя деталей й можливий механізм взаємодії матеріалів в трибосполученнях.

Методика

В роботі використані наступні методи дослідження: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз та узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження), експериментальні дослідження (металографічний аналіз, випробування на мікротвердість, зносостійкість, вимірювання шорсткості поверхні).

Інноваційні матеріали, які досліджені в роботі, є порошками на основі природного матеріалу вітчизняного родовища, що належать до групи серпентинітів, дисперсністю 1...3 мкм.

Хімічний склад досліджених матеріалів містить велику кількість хімічних елементів – близько 32 елементів, у тому числі Mg, Si, Fe, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, Cr, але основна вага припадає на магній, кремній та їх окисли: Mg \approx 23 %, Si – у межах від 18 % до 21 %, MgO – до 38 %, SiO – до 45 %.

Дослідження впливу інноваційних матеріалів було проведено на конструкційній легованій сталі 40XH, яка широко використовується на автомобільному транспорті завдяки поєднанню високої міцності, зносостійкості та прогартованості.

Підготовка металевих зразків зі сталі 40XH включала:

- механічну обробку (шліфування, полірування);
- очищення спиртом;
- висушування.

Дослідження процесів тертя проведено на випробувальному стенді, який створено на базі машини тертя СМЦ–2, за схемою ролик – ролик: один – рухливий, інший – нерухомий.

Навантаження на зразки здійснювалося в діапазоні від 0 кг/см² до 350 кг/см².

Швидкість відносного переміщення поверхонь тертя не перевищувала 60000 мм/хв.

Частота обертання рухомого ролика складала $n = 500$ об/хв.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Температура навколишнього середовища: 20...25 °С.

Умови тертя: у мастильному середовищі з інноваційними присадками.

Концентрація присадки до мастильного матеріалу становила 0,1 % мас.

Мастильний матеріал подавався в зону тертя з резервуару ємністю 50 мл по хлорвінілової трубки з керамічним наконечником. Витрата мастильного матеріалу становила 4 краплі/хв.

Випробування проводилися п'ятигодинними циклами із зупинками через кожну годину для визначення величини зносу методом зважування.

У процесі обробки контролювали такі параметри: температуру, силу струму, тиск, величину плями контакту.

Мікроструктура, мікротвердість, шорсткість і зносостійкість поверхні зразків зі сталі 40ХН досліджено у вихідному стані і після обробки інноваційним матеріалом.

Металографічні дослідження зразків проводили за допомогою мікроскопів ММ-9 та Neophot-2.

Для мікроструктурного аналізу зразків виготовляли шліфи згідно з методикою [3].

Полірування зразків робили за допомогою алмазної пасту.

Травлення зразків проводили у стандартному травителі (4 % розчин HNO_3 в етанолі).

Вимірювання мікротвердості і товщини отриманих шарів проводили на приладі ПМТ-3 вдавленням алмазної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136° , при навантаженнях 0,49 Н і 0,98 Н, витримки під навантаженням 15 с, відповідно до вимог [2]. Дослідження виконувалися шляхом триразового повторення вимірів як по ширині шліфа, так і в глибину зміцненого шару. Відстань між точками вимірювання становила 0,25...0,50 мм.

Шорсткість поверхні вимірювалась профілометром: діапазон вимірювання глибини: до 200 мкм; точність: 0,01...0,05 мкм [5], [6].

Визначення втрати маси зразків здійснено шляхом зважування на аналітичних вагах із точністю до 10^{-4} г.

На початковому етапі було проведено зважування зразків у вихідному стані, що забезпечує базове значення маси для подальших розрахунків.

Після завершення випробувань зразки було очищено від продуктів зношування, знежирено з метою усунення впливу поверхневих забруднень на результати вимірювань.

Зважування дозволяє встановити фактичну масу зразків після експерименту: різниця між початковим та кінцевим значенням маси визначається як показник втрати маси, що характеризує інтенсивність процесів зношування.

Результати

В процесі обробки поверхонь тертя дослідженими матеріалами істотну роль відіграють силікати.

Силікати – це сполуки хімічних елементів із кремнієм, що перебувають у найвищому ступені окислення і утворюють із киснем кремній-кисневі тетраедри $[\text{SiO}_4]^{4-}$ [14].

Основним структурним елементом силікатів є група $[\text{SiO}_4]^{4-}$ з Si^{4+} у центрі з чотирма O^{2-} в вершинах тетраедра з ребрами довжиною 0,264 Å (рис. 1).

У складі інноваційних матеріалів є силікати магнію у різних формах із загальною формулою $n\text{MgO} \cdot m\text{SiO}_2$.

Залежно від концентрації кремнезему (SiO_2) розрізняють орто-, піро-, мета-, дисилікати та інші прості силікати [14].

За характером структурних мотивів, тетраедри $[\text{SiO}_4]^{4-}$ можуть з'єднуватися в комплекси різних форм: кільцеві, ланцюгові, шаруваті, каркасні та інші [14]. До ланцюгових силікатів належить енстатит, а до силікатів із шаруватою структурою відносяться силікати груп тальку, серпентиніту, каолініту.

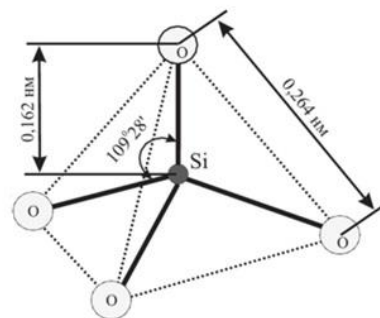


Рис. 1. Тетраедрична ортогрупа $[\text{SiO}_4]^{4-}$

Fig. 1. Tetrahedral orthogroup $[\text{SiO}_4]^{4-}$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Природні силікати містять всі фази, які відповідають діаграмі стану системи $MgO-SiO_2$, але основними фазами є форстерит та енстерит.

Форстерит $2MgO \cdot SiO_2$ має ромбічну кристалічну решітку з параметрами $a = 4,770 \text{ \AA}$, $b = 10,260 \text{ \AA}$, $c = 5,990 \text{ \AA}$. Форстерит стійкий у всьому діапазоні температур, має твердість 7 одиниць за шкалою Мооса.

Енстатит $MgO \cdot SiO_2$ має структуру, що складається з нескінченних ланцюжків, і двох поліморфних форм: енстатиту і кліноенстатиту.

Важливою властивістю силікатів є їх здатність до взаємного утворення твердих розчинів та фазових перетворень.

Сьогодні велика кількість деталей автомобілів виробляється з основних конструкційних матеріалів – сталей і чавунів. У структурі сталей та чавунів, згідно з діаграмою стану $Fe-C$, вуглець, при будь-яких концентраціях, присутній у вигляді цементиту (Fe_3C , Ц). При вмісті вуглецю $C \leq 0,8\%$ цементит входить до складу перліту (П), а при $C > 0,8\%$ – цементит спостерігається у вільному вигляді.

На рис. 2 представлена кристалічна решітка цементиту [16]. Цементит має ромбічну кристалічну решітку з наступними параметрами: $a = 5,077 \text{ \AA}$, $b = 6,776 \text{ \AA}$, $c = 4,515 \text{ \AA}$.

Порівняння параметрів кристалічних решіток цементиту і форстериту (табл. 1) показало практично повний збіг параметрів по двох координатних осях. Близькість параметрів кристалічних решіток цементиту та форстериту дозволяє утворювати на поверхні сталі силікатні сполуки без суттєвого спотворення їх кристалічних решіток, що дуже важливо для проходження дифузійних процесів.

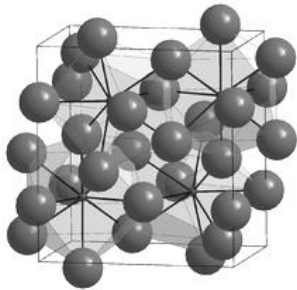


Рис. 2. Кристалічна решітка цементиту Fe_3C

Fig. 2. Crystal lattice of cementite Fe_3C

Дослідження інноваційних присадок до мастильного матеріалу було проведено на конструкційній легованій сталі 40XH, яка використовується для виготовлення високоміцних відповідальних деталей, які працюють в складних умовах динамічних і ударних навантажень, тертя.

Зі сталі 40XH виготовляють осі, вали, шатуни, зубчасті колеса, муфти, вали-шестірні, шпинделі, болти, важелі, штоки, циліндри та інші відповідальні навантажені деталі.

Таблиця 1

Параметри кристалічних решіток цементиту та форстериту

Table 1

Crystal lattice parameters of cementite and forsterite

	Параметр, \AA		
Форстерит	$a = 4,770$	$b = 10,260$	$c = 5,990$
Цементит	$c = 4,515$	$2a = 10,154$	$b = 6,726$
Різниця параметрів, \AA	0,255	0,106	0,736
Різниця параметрів, %	5,3	1,0	10,9

Хімічний склад сталі 40XH наведено в табл. 2 [4].

Таблиця 2

Хімічний склад сталі 40XH

Table 2

Chemical composition of 40XH steel

Вуглець	0,36...0,44
Кремній	0,17...0,37
Марганець	0,50...0,80
Хром	0,45...0,75
Нікель	1,00...1,40

Вихідна структура сталі 40XH – структура після нормалізації – представлена зернами фериту та дрібнопластинчастого перліту.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Під час випробування, частинки матеріалу присадки потрапляють зі змащенням у зону тертя і піддаються впливу контактного тиску. В результаті цього відбувається процес руйнування деяких кристалів присадки і утворення активних радикалів. Одночасно з цим, кристали присадки, які мають більш високу твердість, роблять мікрошліфування поверхонь тертя та видалення окисних плівок. Таким чином, відбувається підготовка контактуючих поверхонь до самого процесу обробки мастильним матеріалом з присадкою, зменшення шорсткості поверхні та її активація.

Під дією контактних навантажень відбувається заміщення катіонів Mg^{2+} в кристалах присадки на катіони Fe^{2+} з утворенням твердих розчинів. Внаслідок цього на поверхні тертя утворюється шар металокераміки, що міцно пов'язаний з поверхнею деталі (рис. 3). Здатність силікатів до утворення взаємних твердих розчинів призводить до того, що металокерамічний шар на поверхні тертя складається з різних за структурою сполук (від нескінченних шарів і ланцюжків до аморфної фази), які пов'язані між собою і здатні до подальших фазових перетворень.

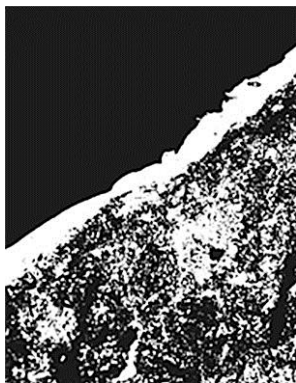


Рис. 3. Структура сталі 40ХН після тертя в умовах мастильного матеріалу з використанням присадки, x 400

Fig. 3. Structure of steel 40XH after friction in a lubricant with the use of an additive, x 400

Дослідження після обробки мастильним матеріалом з присадкою показало, що компоненти присадки дифундують у поверхні шари сталі і утворюють специфічні тверді розчини і хімічні сполуки, глибина проникнення яких становить 0,1...0,2 мм.

Цей процес триває доти, доки вся поверхня металу не буде насичена матеріалом присадки. Завершення процесу насичення поверхні тертя матеріалом присадки супроводжується різким зниженням коефіцієнта тертя та температури вузла тертя.

У підповерхневих шарах сталі 40ХН спостерігається подрібнення цементитних пластин у перліті.

Таким чином, процеси, що відбуваються в зоні тертя при обробці мастильним матеріалом з дослідженими присадками, можна розділити на чотири етапи:

- 1 – активація поверхні;
- 2 – адсорбція матеріалу присадки поверхневими шарами сталі 40ХН;
- 3 – дифузія матеріалу присадки з поверхневого шару углиб металу;
- 4 – відновлення поверхонь тертя зі зменшенням шорсткості.

Вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ–3 (рис. 4).



Рис. 4. Мікроструктура поверхневих шарів з відбитками алмазної піраміди, x 300

Fig. 4. Microstructure of surface layers with diamond pyramid indenter, x 300

В табл. 3 представлено результати дослідження шорсткості, механічних і експлуатаційних властивостей контактуючих поверхонь: мікротвердості, зносостійкості.

Дослідження мікротвердості оброблених поверхонь тертя дозволило встановити певну залежність. Мікротвердість поверхневого шару, що виявляється на мікрошліфі у вигляді світлої смуги (рис. 3), відрізняється від вихідної твердості сталі 40ХН, і, як правило, значно перевищує її (рис. 5). На глибині порядку 0,2 мм і більше мікротвердість порівнюється з вихідною мікротвердістю сталі 40ХН. Максимальне підвищення мікротвердості знаходиться на глибині до 0,04 мм від поверхні тертя.

Таблиця 3

Властивості поверхневих шарів сталі 40ХН

Table 3

Properties of the surface layers of steel 40ХН

Сталь 40ХН	Механічні і експлуатаційні властивості		
	мікротвердість, HV	шорсткість R_a , мкм	зносостійкість
вихідний стан	200	1,25	$1,5 \cdot 10^{-11}$
стан після обробки	585	0,2	$0,4 \cdot 10^{-11}$

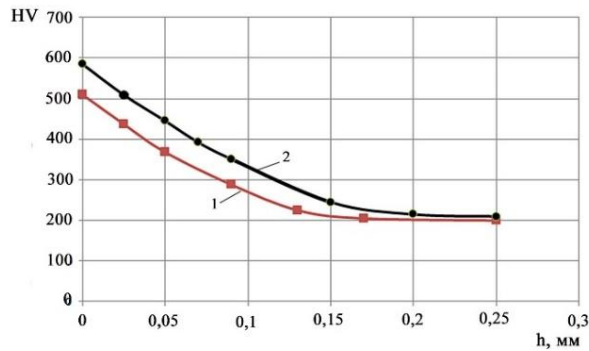


Рис. 5. Залежність мікротвердості сталі 40ХН від глибини шару:

1 – обробка з присадкою 1; 2 – обробка з присадкою 2

Fig. 5. Dependence of microhardness of 40ХН steel on layer depth:

1 – treatment with additive 1; 2 – treatment with additive 2

Проведені випробування поверхонь тертя, що оброблені мастильними матеріалами з присадками, показали збільшення твердості поверхневих шарів у 3 рази, зменшення шорсткості контактуючих поверхонь у 6 разів, підвищення зносостійкості у 4 рази. Підвищення твердості контактних поверхонь в поєднанні з низькою шорсткістю призвело до виникнення унікального антифрикційного ефекту.

На основі проведених досліджень розроблені технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів (присадок) у вузли тертя, які дозволяють не тільки значно знизити зношування, але й відновити функціональний стан зношених поверхонь деталей.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано використання інноваційних матеріалів для запобігання зносу та відновлення функціонального стану поверхонь тертя деталей автомобілів.

Встановлено механізм дії інноваційних матеріалів, який полягає в спрямованій іонній дифузії компонентів спеціального трибологічного складу.

Досліджено механічні і експлуатаційні властивості сталі 40ХН та встановлено, що підвищення твердості контактних поверхонь у поєднанні з низькою шорсткістю призводить до виникнення унікального антифрикційного ефекту.

Проведені дослідження процесів зносу та утворення зносостійких шарів в умовах дії інноваційних матеріалів дозволяють сформулювати умови обробки поверхонь тертя для зниження зносу, зміцнення поверхонь, відновлення функціонального стану зношених поверхонь без зупинки експлуатації механізмів.

Розроблено технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів у вузли тертя, що дозволяють отримувати якісні зносостійкі шари на поверхнях пар тертя.

Висновки

В роботі запропоновані інноваційні матеріали на основі серпентинітів до мастильних матеріалів. В основу розробки покладено ідеї використання матеріалів нового покоління та управління процесами, що відбуваються в зоні контакту пар тертя для підвищення зносостійкості та довговічності трибосполучень.

Проведені експериментальні дослідження механізму взаємодії інноваційних матеріалів зі сталлю 40ХН в умовах тертя, які включають аналіз хімічного складу порошкових матеріалів, металографічні дослідження поверхонь тертя та зміни їх механічних і експлуатаційних властивостей.

Можливий механізм дії інноваційних матеріалів у трибосполученнях полягає в спрямованій іонній дифузії компонентів спеціального трибологічного складу. Компоненти інноваційних матеріалів дифундують у поверхневі шари матеріалу поверхонь тертя та утворюють металокера-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

мічні шари, що являють собою розчини компонентів досліджених матеріалів у фазових складових сталі 40ХН.

Дослідження механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь тертя показали, що твердість та зносостійкість поверхневого шару збільшуються у 3 і 4 рази відповідно, а шорсткість контактних поверхонь зменшується у 6 разів. Підвищення твердості контактних поверхонь у поєднанні з низькою шорсткістю призвело до виникнення унікального антифрикційного ефекту.

Проведені дослідження процесів зносу та утворення зносостійких шарів в умовах дії інноваційних матеріалів дозволяють сформулювати

умови обробки поверхонь тертя для зниження зносу, зміцнення поверхонь, відновлення функціонального стану зношених поверхонь без зупинки експлуатації механізмів.

Розроблено технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів у вузли тертя, що дозволяють отримувати якісні зносостійкі шари на поверхні пар тертя.

Запропоновані інноваційні матеріали дозволяють не тільки знизити знос поверхонь тертя, а також відновити функціональний стан зношених поверхонь без припинення експлуатації механізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Левкович М. Г., Сташків М. Я., Сіправська М. Д. *Основи технології виробництва і ремонту автомобілів* : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.
2. *ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT)*. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2009.
3. *ДСТУ 7175:2010. Метали і сплави. Методи металографічного контролювання. Терміни та визначення понять*. [Чинний від 2010-12-09]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 26 с.
4. *ДСТУ 7806:2015. Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови*. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 50 с.
5. *ДСТУ ISO 4288-2001. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінювання структури поверхні (ISO 4288:1996, IDT)*. [Чинний від 2003-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2003. 14 с.
6. *ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT+ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT+ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT). 3 поправками*. [Чинний від 2013-03-01]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013.
7. Клендій В. М., Ляшук О. Л., Гупка А. Б. *Курс лекцій з дисципліни «Експлуатаційні матеріали» для студентів денної та заочної форм навчання за напрямом 6.070106 «Автомобільний транспорт»*. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. 33 с.
URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18165/1/mater.pdf>
8. Муращенко А. М., Яхно О. М. *Основи теорії змащування: практичні та лабораторні роботи* : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/05a07668-a4fb-4aa2-b85c-b4365c139ec4>
9. Наглюк М. І. *Конспект лекцій з дисципліни «Експлуатаційні матеріали» : для бакалаврів спец. 274 «Автомобільний транспорт»*. Харків : ХНАДУ, 2023. 202 с.
URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17650>
10. Олішевська В. Є., Бас К. М., Кривда В. В. *Основи технології виробництва та ремонту автомобілів. Практикум* : навч. посіб. Дніпро : НТУ «ДП», 2025. 223 с.
URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985>
11. Олішевська В. Є., Бондарчук Т. О. Застосування присадок в автомобільних мастильних матеріалах. *Тиждень студентської науки 2023*. Матеріали 78-ї студ. наук.-техн. конф. (Дніпро, 24-28 квіт. 2023 р.) Дніпро, 2023. С. 150–152. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/163735>

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

12. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Обґрунтування раціонального рухомого складу підприємства в умовах переходу до електромобілів. *Автошляховик України*. 2024. № 2. С. 35–44.
DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44>
13. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С., Іванова Г. П. Металеві конструкційні матеріали для виробництва і ремонту деталей автомобілів: практика та перспективи. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 3(111). С. 111–129. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197>
14. Племянніков М. М., Тобілко В. Ю. *Силікатне матеріалознавство* : навч. посіб. для здобувачів ступеня доктора філософії 161 «Хімічні технології та інженерія». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 103 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6917f3d1-ac80-4c19-a3c9-791682a40f3e/content>
15. Про затвердження «Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту» : Наказ М-ва трансп. України від 30.03.1998 № 102.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text>
16. Прокопович І. В. *Металознавство* : навч. посіб. Одеса : Екологія, 2020. 308 с.
17. Пушка О. С., Войтік А. В. *Конспект лекцій з дисципліни «Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали»*. Для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія». Умань : Уманський НУС, 2020. 101 с. URL: <https://pmoarv.udau.edu.ua/assets/files/2021/lekcii/pmm-lz.pdf>
18. Cai X., Li S., Zeng W., Huang K., Zhao L., Zeng D., Tu X. Improving dispersion and tribological performance of MoS₂ lubricant additive with the synergistic effects of MSH and amorphous carbon. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 29. P. 2509–2519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.003>
19. Gao R., Chang Q., Lichun H., He Y. Nano Magnesium Silicate Hydroxide as Synergistic Lubricant Additive With Micro Carbon Sphere for Enhanced Tribological Properties. *Journal of Tribology*. 2024. Vol. 146, Iss. 3. 031702. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4063702>
20. Ghaednia H., Hossain M. S., Jackson R. Tribological Performance of Silver Nanoparticle–Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants. *Tribol Transaction*. 2016. Vol. 59, Iss. 4. P. 585–592.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1092623>
21. Ghosh G. K., Panda S., Kumar N., Ghosh S. K., Kotia A., Giri J., Kanan M., Sathish T. A multi-faceted review on industrial grade nanolubricants: Applications and rheological insights with global market forecast. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. 103628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103628>
22. Guan Z., Wu Z., Liu J., Tu X., Li S. Controllable fabrication of magnesium silicate hydroxide reinforced MoS₂ hybrid nanomaterials as effective lubricant additives in PAO. *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 597. 153777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153777>
23. Korkmaz M. E., Gupta M. K. Nano lubricants in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend. *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 407. 125261.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261>
24. Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*. 2020. Vol. 1. 100005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
25. Lue Y.-F., Hsiao W.-L., Chen Y.-S. Tribology Performance of Silica Nanoparticles as Lubricant Additives in a Reciprocating Four-Stroke Engine Motorcycle. *International Journal of Automotive Technology*. 2023. Vol. 24, Iss. 2. P. 435–444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0036-3>
26. Lyubchenko O., Gapochenko S. Modification of frictional surfaces of bearings by addition of nanoparticle compositions to lubricants. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : New solutions in modern technology*. 2024. № 3(21). P. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.01>
27. Olishavska V. E., Isakova M. L., Stashevska I. Features of molybdenum disulfide friction. *Widening our Horizons*. Proceedings of the 16th International Forum for Students and Young Researchers. (Dnipro, 21-22 April 2021 p.). Dnipro, 2021. P. 236–239. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160283>
28. Wang C., Yu H., Yin Y., Zhou X., Wang H., Song Z., Wang S., Yang Z., Bai Z. Preparation and Tribological Behaviors of Antigorite and Wollastonite Mineral Dual-Phase-Reinforced Polytetrafluoroethylene Matrix Composites. *Lubricants*. 2024. Vol. 12, Iss. 3. P. 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12030074>
29. Wang L., Gong P., Li W., Luo T., Cao B. Mono-dispersed Ag/Graphene nanocomposite as lubricant additive to reduce friction and wear. *Tribology International*. 2020. Vol. 146. 106228.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106228>
30. Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y. Nanolubricant additives: A review. *Friction*. 2021. Vol. 9, Iss. 5. P. 891–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>

V. E. OLISHEVSKA^{1*}, H. S. OLISHEVSKYI², H. P. IVANOVA³^{1*}Dep. of Motor Vehicle Transport, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail olishevska.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351²Dep. of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel.+38 (095) 56 51 830, e-mail Olishevskiyi.H.S@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527³Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 45 29 945, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

Research on Innovative Materials for Automobile Repair

Purpose. The main purpose of the work is to study the influence of innovative materials for car repair on the structure and properties of friction surfaces of parts and the possible mechanism of interaction of materials in tribological pairs. **Methodology.** The following research methods were used in the work: theoretical research (classification, systematization), analysis and generalization of known scientific results, empirical methods (comparison, observation), experimental research (metallographic analysis, microhardness testing, wear resistance testing, surface roughness measurement). **Findings.** Innovative materials based on serpentinites are proposed. The development is based on the ideas of using new-generation materials and controlling the processes occurring in the contact zone of friction pairs to increase the wear resistance and durability of tribological combinations. Experimental studies of the mechanism of interaction of innovative materials with 40XH steel under friction conditions have shown that the hardness and wear resistance of the surface layer increase by 3 and 4 times, respectively, and the roughness of the contact surfaces decreases by 6 times. The components of innovative materials diffuse into the surface layers of friction surfaces and form metal-ceramic layers, which are solutions of the components of the studied materials in the phase components of 40XH steel. The proposed innovative materials not only reduce the wear of friction surfaces, but also restore the functional condition of worn surfaces without interrupting the operation of mechanisms. **Originality.** The use of innovative materials to prevent wear and restore the functional condition of friction surfaces of automotive parts has been substantiated. The mechanism of action of innovative materials has been established, which consists in the directed ion diffusion of components of a special tribological composition. The mechanical and operational properties of 40XH steel have been studied, and it has been established that an increase in the hardness of contact surfaces in combination with low roughness leads to a unique anti-friction effect. **Practical value.** Studies of wear processes and the formation of wear-resistant layers under the influence of innovative materials allow us to formulate conditions for treating friction surfaces to reduce wear, strengthen surfaces, and restore the functional state of worn surfaces without stopping the operation of mechanisms. Technological methods for introducing innovative materials into friction units have been developed, allowing high-quality wear-resistant layers to be obtained on friction pair surfaces.

Keywords: innovative materials; friction pair; microstructure; hardness; roughness; wear resistance; restoration of friction surfaces

REFERENCES

1. Hevko, I. B., Rohatynskiy, R. M., Liashuk, O. L., Hud, V. Z., Levkovich, M. H., Stashkiv, M. Ya., & Sprivska, M. D. (2021). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva i remontu avtomobiliv*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuia. (in Ukrainian)
2. *Materialy metalievi. Vyznachennia tverdosti za Vikhersom. Chastyina 1. Metod vyprovuvannia, DSTU ISO 6507-1:2007*. (2009). (in Ukrainian)
3. *Metaly i splavy. Metody metalohrafichnoho kontroliuvannia. Terminy ta vyznachennia poniat, 26 DSTU 7175:2010*. (2010). (in Ukrainian)
4. *Prokat iz lehovanoi konstruktsiinoi stali. Tekhnichni umovy, 50 DSTU 7806:2015*. (2016). (in Ukrainian)
5. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Pravyla i protsedury otsiniuvannia struktury poverkhni, 14 DSTU ISO 4288:2001*. (2003). (in Ukrainian)
6. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury, DSTU ISO 4287:2012*. (2013). (in Ukrainian)
7. Klendii, V. M., Liashuk, O. L., & Hupka, A. B. (2016). *Kurs lektsii z dystsypliny «Ekspluatatsiini materialy» dlia studentiv dennoi ta zaochnoi form navchannia za napriamom 6.070106 «Avtomobilnyi transport»*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuia. Retrieved from <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18165/1/mater.pdf> (in Ukrainian).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Murashchenko, A. M. & Yakhno, O. M. (2024). *Osnovy teorii z mashchuvannia: praktychni ta laboratorni roboty*. Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/items/05a07668-a4fb-4aa2-b85c-b4365c139ec4> (in Ukrainian)
9. Nahliuk, M. I. (2023). *Konspekt leksii z dystsipliny «Ekspluatatsiini materialy»: dlia bakalavriv spets. 274 «Avtomobilnyi transport»*. Kharkiv, Ukraine: KhNADU. Retrieved from <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17650> (in Ukrainian).
10. Olishevska, V. E., Bas, K. M., & Krivda, V. V. (2025). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Praktykum*. Dnipro, Ukraine: NTU «DP». Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985> (in Ukrainian)
11. Olishevska, V. E. & Bondarchuk, T. O. (2023, April). Zastosuvannia prysadok v avtomobilnykh mastylnykh materialakh. In *Tyzhden studentskoi nauky 2023. Materialy 78 studentskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (pp. 150-152). Dnipro, Ukraine. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/163735> (in Ukrainian).
12. Olishevska, V. E., & Olishevskiy, H. S. (2024). Substantiating rational rolling stock at an enterprise in the transition to electric vehicles. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny*, 2, 35-44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44> (in Ukrainian)
13. Olishevska, V. E., Olishevskiy, H. S. & Ivanova, H. P. (2025). Metal Structural Materials for the Production and Repair of Automobile Parts: Practice and Prospects. *Science and Transport Progress*, 3(111), 111-129. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197> (in Ukrainian).
14. Plemiannikov, M. M. & Tobilko, V. Yu. (2021). *Silikatne materialoznavstvo*. Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6917f3d1-ac80-4c19-a3c9-791682a40f3e/content> (in Ukrainian)
15. Ministerstvo transportu Ukrainy. (1998). Pro zatverdzhennia «Polozhennia pro tekhnichne obsluhovuvannia i remont dorozhnikh transportnykh zasobiv avtomobilnoho transportu». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text> (in Ukrainian)
16. Prokopovych, I. V. (2020). *Metaloznavstvo*. Odesa, Ukraine: Ekolohiia (in Ukrainian)
17. Pushka, O. S. & Voitik, A. V. (2020). *Konspekt leksii z dystsipliny «Palyvno-mastylni ta inshi ekspluatatsiini materialy»*. Uman, Ukraine: Umanskyi NUS. Retrieved from <https://pmoapv.udau.edu.ua/assets/files/2021/lekcii/pmm-lz.pdf> (in Ukrainian)
18. Cai, X., Li, S., Zeng, W., Huang, K., Zhao, L., Zeng, D. & Tu, X. (2024). Improving dispersion and tribological performance of MoS₂ lubricant additive with the synergistic effects of MSH and amorphous carbon. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 2509-2519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.003> (in English)
19. Gao, R., Chang, Q., Lichun, H. & He, Y. (2024). Nano magnesium silicate hydroxide as synergistic lubricant additive with micro carbon sphere for enhanced tribological properties. *Journal of Tribology*, 146(3), 031702. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4063702> (in English)
20. Ghaednia, H., Hossain, M. S. & Jackson, R. (2016). Tribological performance of silver nanoparticle-enhanced polyethylene glycol lubricants. *Tribology Transactions*, 59(4), 585-592. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1092623> (in English)
21. Ghosh, G. K., Panda, S., Kumar, N., Ghosh, S. K., Kotia, A., Giri, J., Kanan, M. & Sathish, T. (2025). A multi-faceted review on industrial grade nanolubricants: Applications and rheological insights with global market forecast. *Results in Engineering*, 25, 103628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103628> (in English)
22. Guan, Z., Wu, Z., Liu, J., Tu, X. & Li, S. (2022). Controllable fabrication of magnesium silicate hydroxide reinforced MoS₂ hybrid nanomaterials as effective lubricant additives in PAO. *Applied Surface Science*, 597, 153777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153777> (in English)
23. Korkmaz, M. E. & Gupta, M. K. (2024). Nano lubricants in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend. *Journal of Molecular Liquids*, 407, 125261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261> (in English)
24. Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1, 100005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005> (in English)
25. Lue, Y.-F., Hsiao, W.-L. & Chen, Y.-S. (2023). Tribology performance of silica nanoparticles as lubricant additives in a reciprocating four-stroke engine motorcycle. *International Journal of Automotive Technology*, 24(2), 435-444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0036-3> (in English)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

26. Lyubchenko, O. & Gapochenko, S. (2024). Modification of frictional surfaces of bearings by addition of nano-particle compositions to lubricants. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : New solutions in modern technology*, 3(21), 3-9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.01> (in English)
27. Olishevska, V. E., Isakova, M. L. & Stashevska, I. (2021, April). Features of molybdenum disulfide friction. In *Widening our Horizons. Proceedings of the 16th International Forum for Students and Young Researchers* (pp. 236-239). Dnipro, Ukraine. Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160283> (in English)
28. Wang, C., Yu, H., Yin, Y., Zhou, X., Wang, H., Song, Z., Wang, S., Yang, Z. & Bai, Z. (2024). Preparation and tribological behaviors of antigorite and wollastonite mineral dual-phase-reinforced polytetrafluoroethylene matrix composites. *Lubricants*, 12(3), 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12030074> (in English)
29. Wang, L., Gong, P., Li, W., Luo, T. & Cao, B. (2020). Mono-dispersed Ag/graphene nanocomposite as lubricant additive to reduce friction and wear. *Tribology International*, 146, 106228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106228> (in English)
30. Zhao, J., Huang, Y., He, Y., & Shi, Y. (2021). Nanolubricant additives: A review. *Friction*, 9(5), 891-917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.08.2025

Прийнята до друку: 24.12.2025

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК [629.052:629.423]-049.5

Д. О. БОСИЙ^{1*}, О. І. САБЛІН², І. Ю. ПОТАПЧУК³

^{1*}Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056)373 15 25, ел. пошта d.o.bosyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1818-2490

²Каф. «Екологічна та цивільна безпека», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056)373 15 76, ел. пошта o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

³Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056)373 15 25, ел. пошта i.y.potapchuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5985-1040

Підвищення рівня безпеки і захищеності транспортної інфраструктури від повітряних загроз на основі їх акустичної ідентифікації

Мета. Метою дослідження є підвищення рівня безпеки та захищеності транспортної інфраструктури шляхом створення інтелектуальної системи моніторингу, здатної виявляти та класифікувати повітряні загрози за їх акустичними характеристиками. Робота спрямована на розроблення алгоритмів попереднього розпізнавання безпілотних літальних апаратів і крилатих ракет у зоні відповідальності інфраструктурних об'єктів, що є актуальним в умовах гібридних загроз та зростання ролі автономних систем безпеки. **Методика.** Використано комплексний підхід, який об'єднує методи цифрової обробки сигналів, машинного навчання та мікроконтролерних обчислень. Для побудови навчальної вибірки проведено спектральний аналіз акустичних сигналів повітряних об'єктів у середовищі MatLab із застосуванням пакетів Audio Toolbox і DSP System Toolbox. Основними ознаками сигналів стали Mel-частотні кепстральні коефіцієнти (MFCC), що забезпечили ефективно виділення інформативних частотних компонентів. Модель штучної нейронної мережі, оптимізована для контролера STM32, реалізована з використанням бібліотек CMSIS-DSP та X-CUBE-AI. Для передавання даних між сенсорними вузлами застосовано бездротові протоколи ZigBee і LoRa, що дозволяють формувати масштабовану енергоефективну мережу. **Результати.** Система забезпечує реєстрацію, аналіз і класифікацію звукових сигналів у режимі реального часу з точністю 85–90 %. Розроблений прототип сенсорного вузла із MEMS-мікрофоном виконує обчислення локально, без потреби в хмарних сервісах. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано концепцію інтеграції акустичної ідентифікації повітряних загроз у систему моніторингу стану транспортної інфраструктури з використанням вбудованого штучного інтелекту, автономного навчання та локального прийняття рішень. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для створення мереж раннього виявлення загроз, модернізації систем моніторингу контактних мереж, об'єктів критичної інфраструктури та забезпечення технологічної незалежності у сфері оборонних і транспортних рішень.

Ключові слова: залізниця; інфраструктура; електрифікація; контактна мережа; моніторинг; безпека; акустична ідентифікація; повітряні загрози; мікроконтролерні обчислення; мел-частотні кепстральні коефіцієнти; нейронна мережа

Вступ

Залізнична інфраструктура, незалежно від того, чи вона електрифікована, чи працює на дизельній тязі, є ключовим елементом ефективного функціонування глобальних транспортних

мереж. Особливо важливу роль відіграють електрифіковані залізниці, які забезпечують значні екологічні переваги: електропоїзди суттєво знижують викиди парникових газів, мінімізують за-

бруднення повітря та сприяють досягненню цілей сталого розвитку. У порівнянні з дизельними системами, вони відрізняються вищою енергоефективністю та економічною доцільністю, дозволяють досягати більших швидкостей, забезпечують кращу динаміку руху й знижують рівень шуму. Сукупність цих переваг робить електрифікацію основою сталих транспортних рішень, підвищуючи водночас експлуатаційну надійність і якість життя населення, яке проживає поруч із залізницями. Тому у багатьох країнах світу електрифікація залізниць стала пріоритетним напрямом інвестицій, зокрема в Європі, Азії та Північній Америці, які сьогодні демонструють лідерство у впровадженні чистих, швидкісних і надійних транспортних систем.

Однак, як електрифіковані, так і неелектрифіковані залізничні системи стикаються зі значними проблемами, пов'язаними з технічним обслуговуванням, безпекою та експлуатаційною надійністю. Повітряні лінії в електрифікованих мережах, зокрема, схильні до зносу, пошкоджень, пов'язаних з погодними умовами, та потребують частого технічного обслуговування для забезпечення безпечної та ефективної роботи. Ці проблеми можуть призвести до перебоїв у обслуговуванні, високих витрат на технічне обслуговування та збільшення часу простою. Інтернет речей (IoT) пропонує перспективні рішення для моніторингу інфраструктури в режимі реального часу, що дозволяє проводити прогнозне технічне обслуговування, яке передбачає збої та оптимізує графіки технічного обслуговування. Наприклад, пристрої IoT можуть вимірювати критичні електричні параметри, такі як напруга та струм в пристроях електропостачання, допомагаючи зменшити втрати енергії та забезпечити безпечну та ефективну роботу системи.

В останні роки з'явилася нова та нагальна загроза для залізничної інфраструктури: недорогі безпілотні літальні апарати (БПЛА), широко відомі як дрони. Триваючий конфлікт в Україні підкреслив вразливість критичної інфраструктури, оскільки дрони використовуються для націлювання та пошкодження цінних активів, таких як залізничні та енергетичні системи. Традиційні системи протиповітряної оборони мають труднощі з виявленням та перехопленням цих невеликих низьколітаючих загроз, які важко відстежувати за допомогою звичайних методів.

Це створило нагальну потребу в інноваційних підходах, зокрема, і до виявлення та ідентифікації дронів у системах моніторингу інфраструктури.

Збільшення інтенсивності ворожих атак на об'єкти критичної інфраструктури, в т.ч. транспортної (залізничні станції, вузли, тягові підстанції, депо, мости тощо), де, здебільшого, після оголошення повітряної тривоги не припиняється робота і технологічні процеси, значно підвищує потенційні ризики для персоналу, тому потребує вдосконалення системи безпеки таких об'єктів.

Для завчасного попередження робітників про небезпеку використовується національна система оповіщення про повітряну тривогу по окремих областях країни, однак для об'єктів що не припиняють свою роботу важливим є визначення небезпек на більш локальному (об'єктовому) рівні, що може бути реалізовано на основі новітніх технічних засобів за різноманітних ознак. В кінцевому випадку завчасне попередження дозволить працівникам не зупиняючи технологічні процеси встигати вжити необхідних безпекових заходів, наприклад покинути вразливі ділянки і прослідувати в укриття або на більш безпечні майданчики.

Огляд методів ідентифікації повітряних загроз. Виявлення наближення потенційної повітряної загрози базується на основі різних фізичних принципів, зокрема оптичного, радіолокаційного та акустичного [2, 8, 26]. Система ідентифікації повинна забезпечувати не лише фіксацію факту потрапляння повітряної небезпеки в контрольований простір (виявлення), а й розпізнавання типу, визначення параметрів руху (напрямок, висота, швидкість), та селекцію в умовах різного роду завад та можливість інтеграції даної інформації в систему безпеки більш високого рівня.

Ефективне вирішення даних завдань на сучасному технологічному рівні потребує первинних знань та баз даних про унікальні портрети БПЛА різної фізичної природи та їх можливі зміни, що дозволяє підвищувати якість ідентифікації і обмін інформацією на основі використання методів штучного інтелекту. В табл. 1 наведено порівняння основних можливостей засобів виявлення повітряних цілей [2]. Треба заува-

жити, що універсальних засобів виявлення БПЛА за надійністю, всепогодною дією і точністю визначення координат не існує, також важ-

ливим фактором системи ідентифікації є її вартість, простота і можливість швидкого розгортання.

Таблиця 1

Порівняння характеристик засобів виявлення повітряних небезпек

Table 1

Comparison of characteristics of air hazard detection devices

Характеристики	Засоби виявлення повітряних небезпек		
	Оптичні	Радіолокаційні	Акустичні
Виявлення	обмежено	обмежено	обмежено
Розпізнавання	без обмежень	обмежено	обмежено
Селекція	без обмежень	обмежено	обмежено
Вимірювання дальності	обмежено	без обмежень	обмежено
Вимірювання кута	без обмежень	без обмежень	обмежено
Вимірювання швидкості	обмежено	обмежено	обмежено
Залежність від погодних умов	сильна	слабка	середня
Залежність від зовнішньої освітленості	сильна	не залежить	не залежить
Вартість	середня	висока	низька

Оптичні засоби є досить надійними для виявлення малорозмірних, малошвидкісних і таких, що мають малі значення теплової та радіолокаційної сигнатур БПЛА [6].

Важливим показником ефективності оптичних засобів є межа виявлення БПЛА різної розмірності для об'єктиву оптико-електронної системи із заданим кутом поля зору та фокусною відстанню за метеорологічної дальності видимості 100 км і коефіцієнті розсіювання у видимій області спектра [20]. Якість оптичної ідентифікації суттєво залежить від зміни спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери за довжинами хвиль, також залежить від метеорологічної дальності видимості і визначається погодними умовами.

Радіолокаційний контроль повітряного простору є досить ефективним у тому випадку, коли помітність (відбивна здатність) БПЛА в діапазоні радіохвиль відповідає розпізнавальній здатності радіолокаційної станції. Відбивні властивості БПЛА в радіолокаційній станції оціню-

ються за ефективною площею розсіювання повітряного об'єкта [3].

Незважаючи на те, що радіолокація є достатньо надійним засобом контролю повітряного простору, завдання виявлення та ідентифікації малорозмірного малошвидкісного ударного БПЛА з малою ефективною площею розсіювання становить проблему [3]. БПЛА з масою менше 5,0 кг суттєво звужують межі їхнього виявлення, а висока частка радіопрозорих матеріалів в конструкції майже унеможлиблює їхнє виявлення за допомогою радіолокації [25]. Також варто зазначити, що радіолокаційні станції є активними засобами сканування повітряного простору, а через їхнє випромінювання під час роботи стають вразливими до протирадарних БПЛА.

Важливою інформативною ознакою БПЛА під час польоту є акустичне випромінювання, яке дозволяє виявляти БПЛА в умовах коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності. Акустичні (звукові) хвилі, що генеруються БПЛА, поширюються у прос-

торі і можуть фіксуватися акустичними приймачами сигналу (мікрофонами), які перетворюють акустичний тиск на електричний сигнал. Межі акустичного виявлення визначаються чутливістю мікрофонів.

Джерелами звукових хвиль БПЛА зазвичай є рухомі установки і лопаті повітряних гвинтів, де частота генерованого звуку кратна частоті обертання колінчастого вала поршневого двигуна, кількості та частоті обертання лопатей повітряного гвинта, а інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей повітрям [9].

У реальному середовищі акустичне випромінювання згасає внаслідок в'язкості повітря та молекулярного тертя. Загасання звукових хвиль також відбувається при їхньому поширенні вздовж поглинаючої поверхні та визначається її коефіцієнтом поглинання. Однак істотнішу роль у згасанні звукових хвиль відіграє турбулентність повітря. Неабияку вагу в цьому відіграє вітер і висхідні потоки повітря. На низьких частотах додаткове загасання залежить від відстані до джерела звуку, а на далеких (понад 4 км) відстанях високі частоти практично не відчутні.

Застосування акустичних систем виявлення забезпечує визначення пеленгу літального апарату та його класу (типу). Акустичні системи, мають такі переваги [17]:

- забезпечують стійке автоматичне виявлення малозшвидкісних маловисотних повітряних цілей в будь-яких погодних умовах та в умовах складних рельєфів місцевості;
- скритність роботи та збереження працездатності в умовах радіоелектронної протидії;
- малі габарити, низьке енергоспоживання та кращі показники «ефективність–вартість».

Таким чином, завдання акустичної ідентифікації БПЛА і крилатих ракет полягає у розробці моделі, яка дозволить адекватно описувати спектральні і кореляційні властивості акустичного сигналу на значних часових інтервалах, та забезпечить підвищення спектрального розрізнення в області низькочастотних складових спектра досліджуваного сигналу.

Існуючі рішення для моніторингу залізничної інфраструктури. Численні дослідження [7, 19] стосуються моніторингу та діагностики залізничної інфраструктури з метою підвищення без-

пеки та ефективності експлуатації. В одній з таких робіт представлено систему PAMAR SMD – діагностичний пристрій для залізничних контактних мереж, який збирає дані в режимі реального часу про напругу живлення, температуру, вологість та загальний стан системи. Ця система сприяє підвищенню безпеки, знижує витрати на відновлення та мінімізує компенсації, пов'язані із затримками. Інше дослідження зосереджене на моніторингу струмознімачів під час фактичної експлуатації, представляючи підхід на основі станцій, який виявляє проблеми шляхом аналізу вертикального зміщення контактних проводів, спричиненого проїздом поїздів. Виявляючи надмірні або недостатні контактні сили, ця система забезпечує безпечну та надійну роботу пантографа.

Система моніторингу контактної мережі Siemens Sicat® CMS (Ceterary Monitoring System) [23] пропонує безперервний та безконтактний моніторинг сил натягу контактних проводів. Вона оцінює дані датчиків та передає відфільтровану інформацію до центрів управління для швидкого виявлення та локалізації несправностей. Серед помітних особливостей – неінвазивні вимірювання, які запобігають зносу механічних компонентів, надійне виявлення за допомогою відстеження нахилу поворотного важеля, легке модернізування існуючих систем та низькі вимоги до обслуговування. Сигналізація, керування подіями, та цільове повідомлення про несправності ще більше підвищують експлуатаційну ефективність без перевантаження даними.

Компанія Sensonic GmbH [21] розробила систему SonicTwin®, яка використовує волоконно-оптичне зондування вібрації для отримання прогнозу інформації про цілісність колії та потенційні ризики для безпеки. Використовуючи існуючу волоконно-оптичну комунікаційну інфраструктуру, це рішення забезпечує економічно ефективний та масштабований моніторинг.

Додаткові досягнення в діагностиці залізниць включають інтеграцію сенсорних технологій та аналіз даних у режимі реального часу [13]. Підхід «закритої системи» [14], який полягає в тому, що сучасні датчики інтегровані з централізованими архітектурами прийняття рішень, дозволяє покращити оперативність реагування

при обслуговуванні інфраструктури завдяки автоматичному виявленню дефектних вузлів. Паралельні зусилля в галузі інтелектуальних систем тягового живлення [15] спрямовані на оптимізацію управління енергоспоживанням та зменшення капіталовкладень завдяки оптимальному управлінню перетворювачами, пристроями накопичення енергії та відновлюваними джерелами. Ці рішення базуються на синхронізованих вимірюваннях розподілу напруги, що досягаються за допомогою малопотужних мікроконтролерів (наприклад, Atmega128RFA1) та бездротової передачі даних.

У контексті зростаючих загроз безпеці, використання безпілотних літальних апаратів створює нові вразливості для критичної інфраструктури, включаючи залізничні системи. В дослідженні [28] представлена автономна платформа виявлення дронів далекого радіусу дії, яка інтегрує апаратні та програмні компоненти для ефективною локалізації цілей. Вона оснащена адаптивною системою фокусування камери та нейронною мережею, що забезпечує точність виявлення 95,5 % на відстанях до 250 метрів. Система, побудована на NVIDIA GeForce GTX 1080, обробляє двопотоковий медіа-вхід з низькою затримкою та записує події вторгнення з контекстними метаданими.

Ще один перспективний підхід [11] використовує алгоритми акустичного виявлення та глибокого навчання для ідентифікації БПЛА. Щоб подолати дефіцит маркованих аудіоданих дронів, пропонується гібридний набір даних, що поєднує реальні записи із синтетичним аудіо, згенерованим генеративно-змагальними мережами (GAN). Порівняльне тестування архітектур нейронних мереж CNN, RNN та CRNN демонструє ефективність гібридного набору даних у розпізнаванні як відомих, так і нових БПЛА, підтверджуючи потенціал GAN для підвищення точності класифікації.

Зростаюча популярність дронів у таких галузях, як логістика, безпека та інженерія, підвищує актуальність автоматизованих систем виявлення. У [24] модель виявлення на основі YOLOv4 навчається на змішаних наборах даних про дрони та птахи. Оцінка продуктивності виконується з використанням таких показників, як середня точність, прецизійність, повнота, F1-

оцінка та FPS – показує, що система досягає високої швидкості та точності виявлення, особливо при тестуванні на платформах DJI Phantom III та DJI Mavic Pro.

У сукупності ці дослідження підкреслюють швидкий розвиток та інтеграцію систем моніторингу широкої зони та технологій виявлення дронів у сучасний захист інфраструктури. Використання платформ Інтернету речей, хмарних обчислень та недорогих вбудованих систем дозволяє розгортати масштабовані, високопродуктивні рішення для моніторингу. Включення механічних та екологічних параметрів підвищує стійкість системи, тоді як глибоке навчання та генерація синтетичних наборів даних значно підвищують точність виявлення дронів. Ці інновації забезпечують своєчасне виявлення несправностей, ефективне планування технічного обслуговування та стійкість до повітряних загроз, підтримуючи безпечну, надійну та сталу роботу критично важливої залізничної інфраструктури.

Мета

Метою цієї роботи є надання комплексного огляду сучасного стану технологій моніторингу залізниць, включаючи інтеграцію Інтернету речей для моніторингу стану інфраструктури та виявлення повітряних загроз. Це включає:

- аналіз поточного стану існуючих рішень для моніторингу залізничної інфраструктури;
- дослідження акустичних сигнатур повітряних загроз та їх ідентифікацію;
- вивчення методів інтеграції машинного навчання та нейронних мереж у системи виявлення повітряних у режимі реального часу;
- розробку апаратного та програмного рішення для вбудованого аудіо виявлення повітряних загроз на основі штучного інтелекту, оптимізованого для використання на мікроконтролерних платформах.

Вирішуючи ці цілі, дослідження має на меті сприяти розробці більш стійких та безпечних залізничних систем, здатних захищати критично важливі активи від нових загроз, зберігаючи при цьому операційну ефективність.

У цій роботі розглядаються технічні рішення та досліджується інтеграція аудіосистем виявлення дронів з моніторингом залізничної інфраструктури в режимі реального часу. Зокрема,

увага зосереджується на використанні можливостей систем моніторингу широкого спектру (WAMS) для моніторингу механічних параметрів пристроїв електропостачання. Крім цього, досліджується як ці системи можна покращити, включивши децентралізовані, автономні рішення на основі штучного інтелекту для виявлення БПЛА, використовуючи акустичний аналіз для ідентифікації унікальних звукових сигнатур дронів.

У першу чергу підвищення безпеки полягає в ранньому виявленні та розпізнаванні повітряних небезпек, що наближаються, таких як ударні безпілотні літальні апарати або крилаті ракети, з метою використання цієї інформації для прийняття відповідних рішень і захисту.

Методика

Ідентифікація та класифікація повітряних загроз на основі акустичних сигнатур є критично важливим компонентом розробки ефективних систем виявлення в реальному часі для захисту критичної інфраструктури. Особлива увага в цьому дослідженні приділяється низьколітаючим безпілотним літальним апаратам (БПЛА), які становлять значну небезпеку через свою здатність наближатися до цілей на малих висотах, часто уникаючи звичайного радіолокаційного виявлення. Ці БПЛА зазвичай виробляються серійно з використанням економічно ефективних двигунів внутрішнього згоряння, таких як поршневі двигун MD–550, що широко використовується в імпровізованих або комерційно модифікованих ударних безпілотниках. Їхній політ створює характерний акустичний слід – поєднання циклічної роботи поршневого двигуна та взаємодії лопатей ротора з повітрям – який часто сприймається як глибоке, повторюване гудіння чи гул.

Для подальшого вдосконалення алгоритмів класифікації наявний набір даних було розширено, включивши аудіо- та відеофрагменти прольотів крилатих ракет. Ці загрози демонструють чітко інший акустичний профіль, що характеризується більш стабільним і безперервним високочастотним спектром шуму, спричиненим стійким реактивним рухом. Однак кількість перевірених записів крилатих ракет була обмежена порівняно зі значним обсягом даних БПЛА типу Shahed.

Важливим кроком у цьому дослідженні займав збір та попередня обробка аудіосемплів із загальнодоступних джерел, включаючи відкриті канали соціальних мереж. Зібрані записи були відредаговані для вилучення чистих акустичних сегментів – видалення звуків вибухів, людської мови та інших нерелевантних шумових артефактів. Аудіодоріжки були відокремлені від відеозаписів та обрізані, щоб зосередитися на фазах прольоту.

Оброблений набір даних потім був підданий спектральному аналізу для виділення стабільних частотних компонентів, які постійно з'являються в записах конкретних повітряних загроз. Аналіз було проведено в MatLab за допомогою Audio Toolbox та DSP System Toolbox, що дозволило генерувати спектрограми високої роздільної здатності та статистичне моделювання розподілу звукової енергії з плином часу та частоти.

Процес вилучення акустичної сигнатури включав порівняння кількох випадків прольотів БПЛА та ракет, фільтрацію шуму навколишнього середовища та виявлення повторюваних спектральних шаблонів. Це дозволило отримати характерні акустичні «відбитки» для кожного типу повітряної загрози. Ці «відбитки» включали домінуючі частотні смуги, гармонійні структури та часову динаміку звукової енергії.

Отримані акустичні моделі враховують мінливість звуку через доплерівські зсуви, поширення в різних середовищах та обмеження записуючих пристроїв. Незважаючи на ці фактори, у кількох зразках були виявлені узгоджені характеристики спектральної щільності, що забезпечує надійну основу для класифікації сигналів.

Приклади необроблених акустичних сигналів та їхні відповідні частотні спектри для двох різних типів повітряних загроз – ударного безпілотника та крилатої ракети – показані на рис. 1. Ці сигнали ілюструють часову форму хвилі та спектральний розподіл при піковій інтенсивності. Отримані акустичні сигнатури, отримані за допомогою спектрального аналізу та фільтрації, де рис. 1, *а* відповідає типовому БПЛА з поршневим двигуном, а рис. 1, *б* ілюструє сигнатуру крилатої ракети з реактивним двигуном.

Візуальні відмінності в гармонійній структурі та домінуючих діапазонах частот між двома типами загроз формують основу для подальшої класифікації та виявлення.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

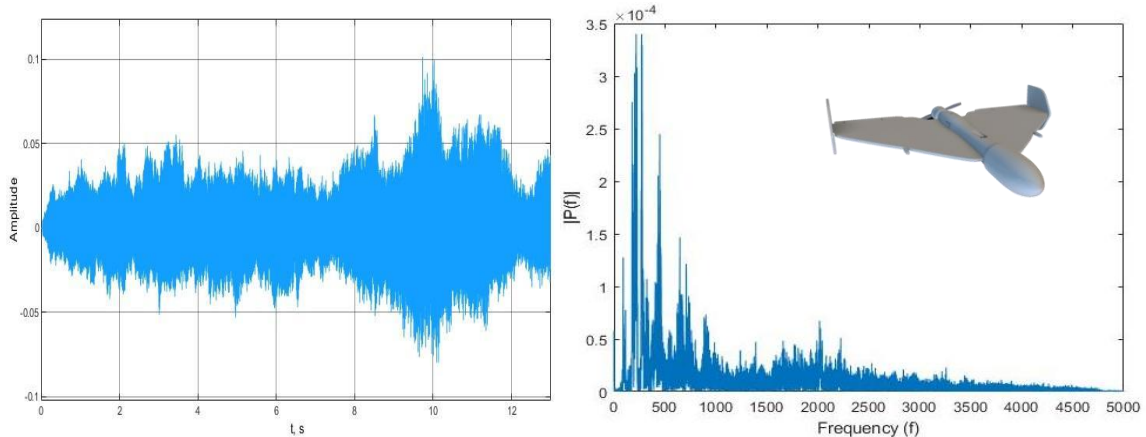
Ці результати формують основу для алгоритмів акустичного розпізнавання, та демонструють можливість ідентифікації конкретної загрози за допомогою недорогих вбудованих мікрофонних систем.

Ключові спектральні та часові характеристики акустичних випромінювань від БПЛА та крилатих ракет наведено в табл. 2.

Це порівняння підкреслює різні акустичні профілі дронів з поршневыми двигунами, таких як ті, що базуються на двигунах MD–550, порівняно з крилатими ракетами з реактивним двигуном. Помітні відмінності включають домінуючі діапазони частот, гармонійну структуру та моделі модуляції звуку, які є критично важливими для ефективної класифікації загроз.

Доміnantний діапазон частот стосується первинної енергетичної смуги, в якій зосереджені найгучніші компоненти звуку, що слугує ключовим індикатором типу акустичного джерела. Гармонічні компоненти відображають наявність періодичних сигналів, що часто виникають внаслідок циклів двигуна та взаємодії лопатей ротора – ознак, які особливо виражені в поршневих дронах. Піки спектральної щільності відображають різке збільшення акустичної енергії на певних частотах і є цінними для розрізнення різних типів повітряних загроз. Мінливість звукового тиску описує ступінь, до якої амплітуда акустичного сигналу коливається з часом, фіксуючи ефекти модуляції, характерні для певних рухомих систем.

a – a



b – b

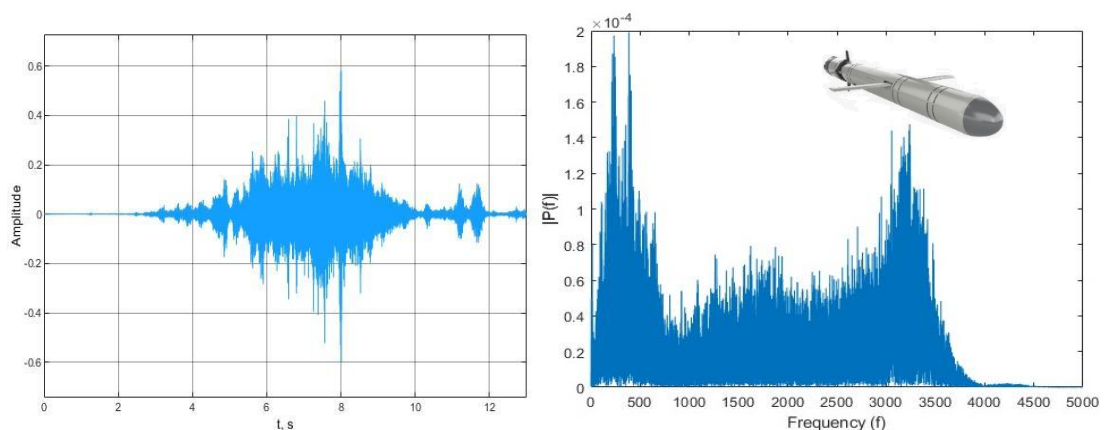


Рис. 1. Акустичні сигнатури ударного безпілотної (а) та крилатої ракети (б)

Fig. 1. Acoustic signatures of a strike drone (a) and a cruise missile (b)

Таблиця 2

Порівняння характеристик виявлених повітряних небезпек

Table 2

Comparison of characteristics of identified air hazards

Параметр	БПЛА (Шахед)	Крилата ракета
Домінантний діапазон частот	80–250 Гц	400–1000 Гц
Гармонічні складові	Явні, періодичні гармоніки до 2 кГц	Широкий спектр, менш структурований
Патерн модуляції	Амплітудна модуляція, зумовлена обертанням лопаті (3–8 Гц)	Відносно стабільний тон, незначні коливання амплітуди
Піки спектральної щільності	Дискретні піки кожні ~80–120 Гц	Безперервна підвищена спектральна смуга
Тип шуму	Ппульсуючий шум двигуна + гармоніки від лопатей	Тривале ревіння реактивного літака
Змінність звукового тиску (вікно 5 секунд)	Коливання ± 6 дБ (через модуляцію)	Коливання ± 2 дБ
Тривалість виявленої сигнатури	5–15 секунд до прольоту	3–8 секунд до прольоту
Наявність доплерівського зсуву	Помірний (змінна геометрія шляху)	Чітка зміна тону при русі
Частота дискретизації запису	Рекомендовано ≥ 16 кГц	Бажано ≥ 24 кГц
Ефективна кількість смуг MFCC	13–20	20–30

Результати

Класифікація повітряних загроз на основі акустичних даних є спеціалізованим випадком розпізнавання звуків навколишнього середовища, добре відомої галузі штучного інтелекту. Ця проблема включає визначення типу звукової події з аудіозапису, часто за наявності фонового шуму або мінливості навколишнього середовища. У нашому випадку метою є розрізнення БПЛА, таких як поршневі дрони, та інших повітряних загроз, таких як крилаті ракети, на основі їх унікального акустичного випромінювання, зафіксованого в реальних умовах.

Для досягнення надійного розпізнавання за такої мінливості автори пропонують використувати моделі глибокого навчання, які довели свою ефективність для класифікації аудіо. Ці моделі автоматично вивчають відповідні шаблони з представлень ознак, таких як спектрограми або кепстральні коефіцієнти. Серед ши-

роко використовуваних моделей є штучні нейронні мережі (ШНМ) та згорткові нейронні мережі (ЗНМ), кожна з яких пропонує компроміс між складністю, часом навчання та ефективністю розгортання.

Це дослідження базується на загальнодоступній реалізації системи класифікації аудіо [10, 27], і автори висловлюють подяку творцю проекту за внесок у відкритий код, який дозволив адаптацію до завдань виявлення дронів. Згадана система пропонує практичне порівняння архітектур нейронних мереж ANN, CNN1D та CNN2D на наборі даних UrbanSound8K та демонструє, як такі моделі можна навчати та розгортати з високою зручністю використання. На поточному етапі розробки було обрано модель ANN, оскільки вона пропонує найвищу ймовірність класифікації для цільових типів звуку та має передбачувану, масштабовану архітектуру, добре пристосовану для вбудованої реалізації.

Для ефективного подання аудіоданих у моделі машинного навчання, необроблені сигнали хвиль повинні бути перетворені на компактні, змістовні представлення. У цьому дослідженні використано Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) – широко поширену функцію в розпізнаванні мовлення та звуку.

Однією з ключових переваг MFCC є їхня стійкість до різної тривалості вхідних звуків. На відміну від необроблених хвильових форм або простих спектральних ознак, MFCC обчислюються для коротких кадрів, що перекриваються (наприклад, 25 мс з кроком 10 мс), а потім усереднюються або об'єднуються з плином часу, що забезпечує послідовну розмірність ознак навіть для аудіосигналів різної тривалості. Це робить MFCC добре придатними для обробки аудіосегментів БПЛА та ракет, записаних у польових умовах, тривалість яких може змінюватися від 2 до 10 секунд залежно від умов запису.

Загальна формула для k -го коефіцієнта MFCC з віконного сигнального кадру визначається виразом:

$$C_k = \sum_{n=1}^N \log(S_n) \cdot \cos\left[\frac{\pi k}{N}(n-0.5)\right],$$

$$k = 1, 2, \dots, K,$$

де S_n – енергетичний вихід n -го Мел-фільтра; N – кількість фільтрів Мела; K – кількість збережених кепстральних коефіцієнтів (зазвичай 13–20).

Практична реалізація передбачає розподілену систему акустичного виявлення, що складається з автономних сенсорних блоків, розміщених у сітці вздовж критично важливих зон інфраструктури. Кожен блок включає:

- мікрофонний масив для всеспрямованого захоплення звуку;
- локальну попередню обробку та вилучення MFCC у режимі реального часу;
- вбудовану нейронну мережеву модель для класифікації вхідного аудіокадру;
- бездротовий зв'язок (наприклад, ZigBee, LoRa) для пересилання сповіщень.

Система працює наступним чином:

1. Акустичні дані безперервно фіксуються кожним вузлом.

2. Характеристики MFCC обчислюються та передаються в локально збережений класифікатор.

3. Після виявлення повітряної загрози метадані (тип, достовірність, позначка часу, можливо, напрямом) надсилаються до центрального вузла.

4. Дані датчиків з кількох вузлів можна об'єднати для оцінки траєкторії та швидкості БПЛА.

Вузли повинні бути малопотужними, самодостатніми та розробленими для інтеграції в більшу мультимодальну систему оповіщення. Така архітектура дозволяє масштабований та багаторівневий захист залізничних та енергетичних активів.

В табл. 3 представлено середні коефіцієнти MFCC для набору класифікованих аудіозразків. Кожен аудіоклас, включаючи повітряні загрози (наприклад, БПЛА, ракета) та звуки навколишнього середовища, демонструє чіткий спектральний профіль. Незважаючи на певну кореляцію між подібними класами, всі вектори-стовпці є унікальними, що підтверджує, що набір ознак MFCC ефективно фіксує розрізнявальні характеристики. Це підтверджує достовірність представлення на основі MFCC для надійної класифікації аудіо.

На рис. 2 показано загальну архітектуру штучної нейронної мережі (ШНМ), що використовується для класифікації аудіо. Вхідний шар складається з 20 нейронів, що відповідає кількості вилучених ознак MFCC на аудіосегмент. Вихідний шар містить нейрони, що дорівнює кількості цільових аудіокласів, що дозволяє здійснювати багатокласову класифікацію.

Мережа включає кілька прихованих шарів, структура яких змінюється в різних конфігураціях для балансування продуктивності класифікації та обмежень пам'яті. Оскільки цільова апаратна платформа базується на мікроконтролері STM32 із загальним об'ємом флеш-пам'яті 512 КіБ, кількість та розмір прихованих шарів оптимізовані для забезпечення того, щоб вся мережа могла поміститися приблизно в 450 КіБ доступної пам'яті програм, що дозволяє розгорнути її на вбудованих системах без зовнішньої пам'яті.

Таблиця 3

Середні коефіцієнти MFCC для класифікованих аудіозразків

Table 3

Average MFCC coefficients for classified audio samples

MFCC № (C_k)	БПЛА	Ракета	Гавкіт собаки	Шум двигуна	Відбійний молоток
1	-254,4	-163,6	-215,2	-125,8	-64,8
2	113,8	117,8	80,9	78,4	47,3
...
20	0,3	-0,7	2,3	2,3	2,2

В табл. 4 зведені характеристики продуктивності кількох конфігурацій штучних нейронних мереж, що використовуються для класифікації аудіо. Кожен рядок відповідає певній архітектурі прихованого шару, а кількість нейронів у кожному шарі вказана в першому стовпці.

У другому стовпці табл. 4 показано загальний розмір моделі в КіБ, розрахований на основі кількості параметрів, що навчаються, з використанням 32-бітної точності з плаваючою комою. У третьому стовпці представлено результуючу точність валідації, досягнуту в задачі класифікації.

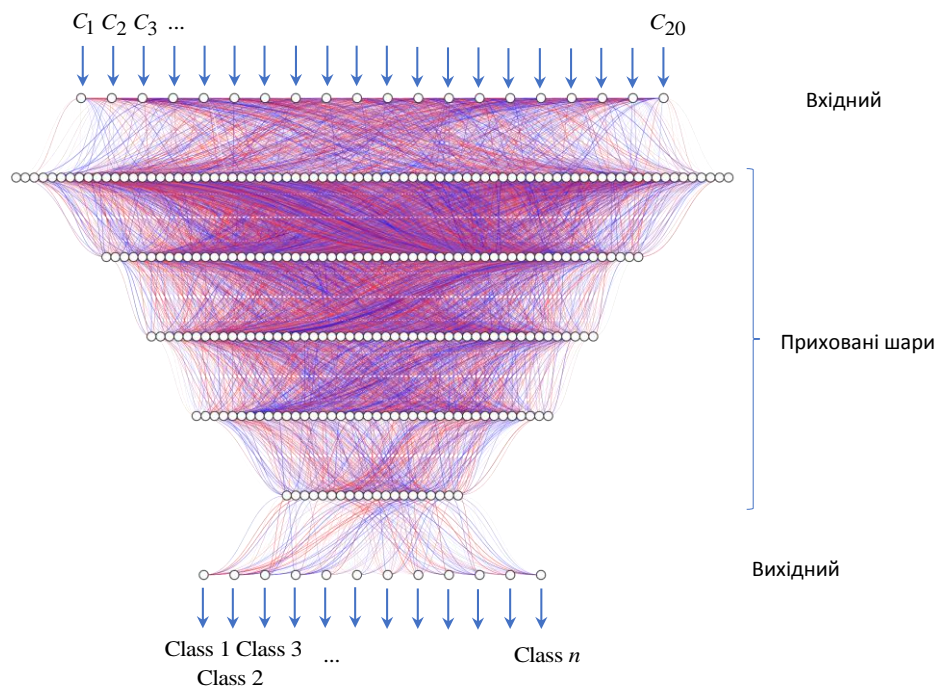


Рис. 2. Загальна архітектура штучної нейронної мережі, що використовується для класифікації

Fig. 2. General architecture of the artificial neural network used for classification

Таблиця 4

**Розмір та точність цільової моделі штучної нейронної мережі
залежно від архітектури прихованого шару**

Table 4

**Size and accuracy of the target model of an artificial neural network depending
on the architecture of the hidden layer**

Архітектура прихованих шарів ШНМ	Розмір моделі ШНМ	Точність при валідації
1000–750–500–250–100–50	4,98 МіБ	0,9046
512–256–128–64–32	737,5 КіБ	0,8850
416–208–104–52–26	497,9 КіБ	0,8931
400–200–100–50–25	462,7 КіБ	0,8899
392–196–98–49–24	445,4 КіБ	0,8959
384–192–96–48–24	428,7 КіБ	0,8909
368–184–92–46–23	396,1 КіБ	0,8822
352–176–88–44–22	364,8 КіБ	0,8746
320–160–80–40–20	306,2 КіБ	0,8866
256–128–64–32–16	204,9 КіБ	0,8479
128–64–32–16	65,3 КіБ	0,8026
32–16	16 КіБ	0,6963

Хоча дані загалом показують, що збільшення кількості нейронів призводить до покращення точності, ця тенденція не є суворо монотонною через стохастичний характер процедур навчання, включаючи ініціалізацію випадкових ваг та міні-пакетний вибір. Це підкреслює компроміс між продуктивністю класифікації та обмеженнями пам'яті, що особливо важливо для розгортання на вбудованих системах з обмеженим обсягом флеш-пам'яті, таких як мікроконтролери STM32.

На рис. 3 ілюструється динаміка навчання вибраної моделі ШНМ, що показує еволюцію точності класифікації протягом епох навчання як для навчальних, так і для валідаційних наборів даних.

Стабільна конвергенція та мінімальний розрив між точністю навчання та валідації свідчать про те, що модель добре узагальнюється без значного перенавчання. На рис. 4 представлено зв'язок між розміром моделі та точністю класифікації для різних архітектур ШНМ. Як пока-

зано, збільшення кількості нейронів прихованого шару покращує точність до певної точки, після якої приріст продуктивності зменшується.

У практичному діапазоні розмірів ШНМ від 300 до 500 КіБ спостережувана точність валідації залишається в межах 85–90 %, що демонструє можливість розгортання надійної класифікації на основі штучного інтелекту на мікроконтролерах, таких як STM32, без перевищення обмежень доступної пам'яті.

Розробка апаратного та програмного забезпечення вбудованого ШІ-рішення. Впровадження вбудованого рішення на основі штучного інтелекту зосереджено навколо трьох основних компонентів: MEMS-мікрофона, мікроконтролера STM32 та модуля бездротового зв'язку ZigBee. MEMS-мікрофон пропонує високу чутливість, компактний розмір та низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним для безперервного акустичного моніторингу в розподілених сенсорних мережах. Мікроконтролер STM32 служить центральним процесором, обра-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ним завдяки балансу обчислювальних можливостей, низького енергоспоживання та підтримки нейронного мережевого виводу на пристрої через STM32Cube.AI. Модуль ZigBee забезпечує надійну бездротову передачу даних з низьким енергоспоживанням до систем вищого рівня або

координаторів у конфігураціях меш-мереж. Разом ці компоненти утворюють компактне, економічно ефективне та енергоефективне вбудоване рішення, адаптоване для польового розгортання в критично важливих інфраструктурних середовищах.

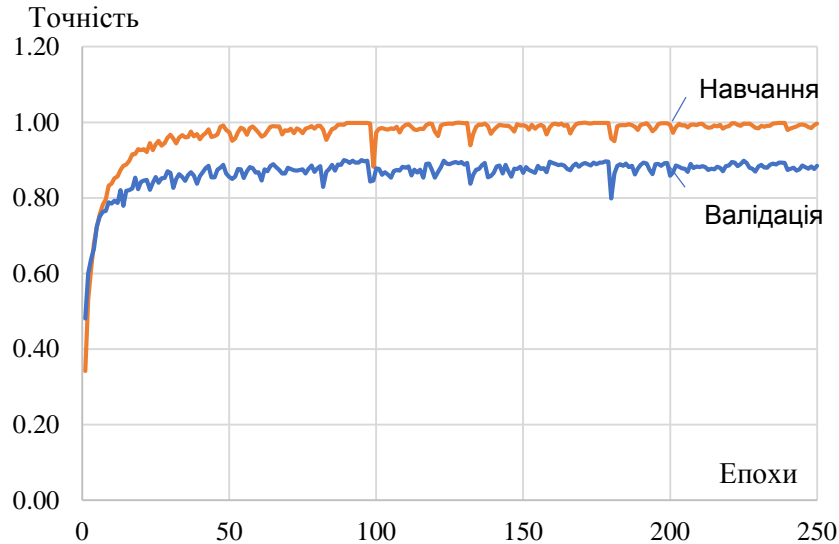


Рис. 3. Точність при навчанні та при валідації штучної нейронної мережі

Fig. 3. Accuracy during training and validation of the artificial neural network

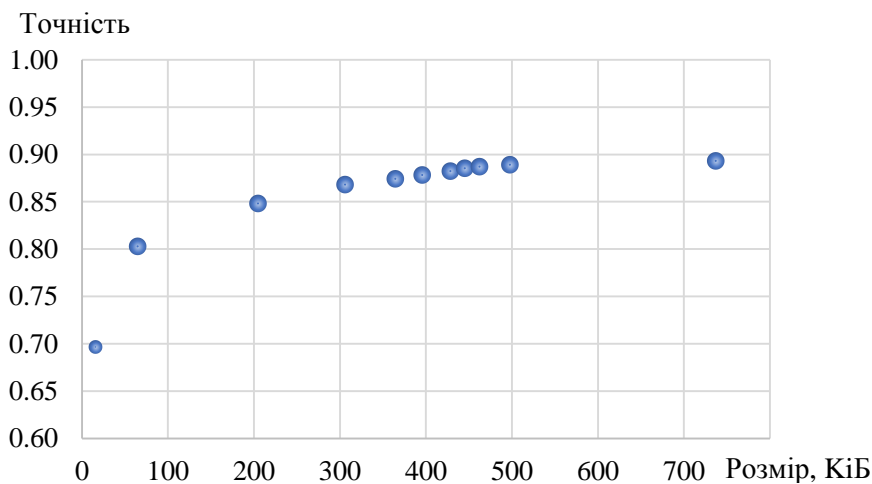


Рис. 4. Точність в залежності від розміру цільової моделі штучної нейронної мережі

Fig. 4. Accuracy depending on the size of the target artificial neural network model

На рис. 5 представлено схематичну діаграму апаратної архітектури, розробленої для вбудованої аудіосистеми виявлення дронів.

На рис. 6 показано процес інтеграції штучної нейронної мережі в прошивку мікроконтролера за допомогою середовища генерації коду STM32Cube.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

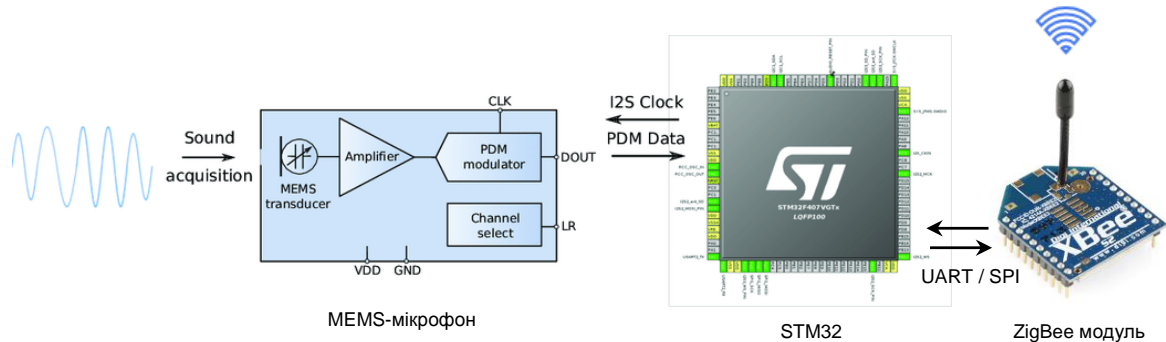


Рис. 5. Принципова схема датчика-аудіодетектора дронів

Fig. 5. Schematic diagram of the drone audio-detector sensor

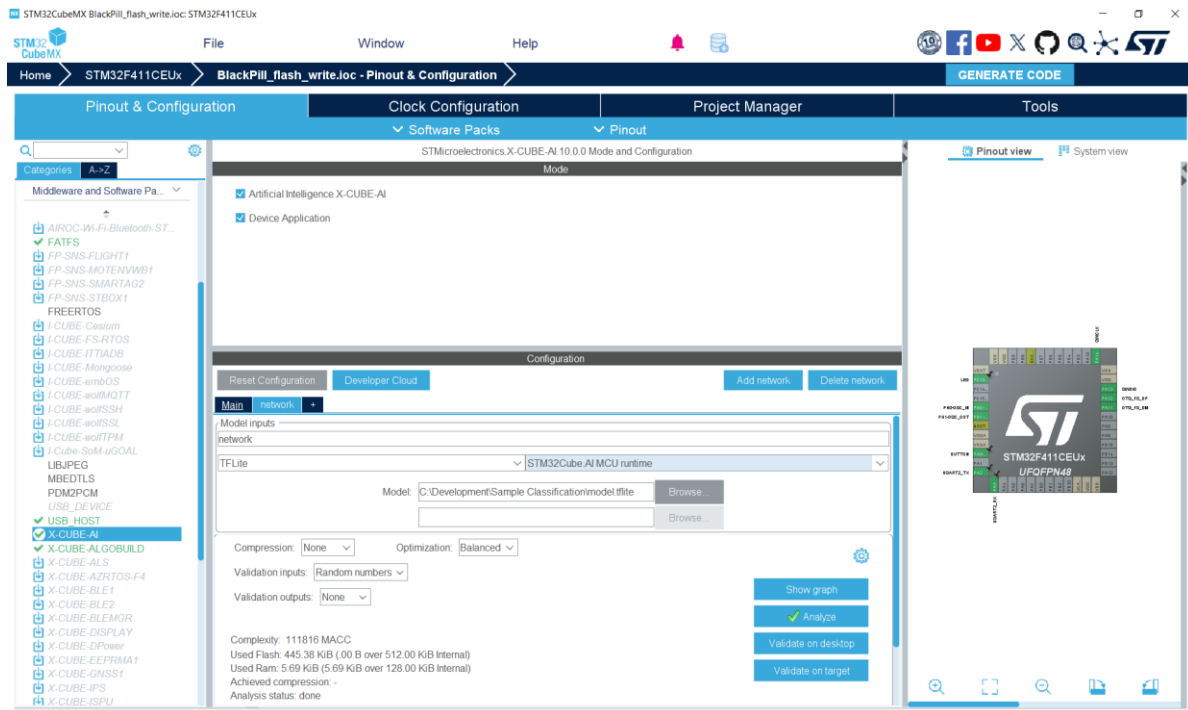


Рис. 6. Інтеграція штучної нейронної мережі у прошивку мікроконтролера за допомогою засобу ініціалізації коду STM32Cube

Fig. 6. Integration of the artificial neural network into the microcontroller firmware using the STM32Cube code initialization tool

Платформа STM32 підтримує модульний підхід через існуючі програмні бібліотеки, що дозволяє ефективно розробляти вбудовані програми штучного інтелекту. Для цифрового захоплення звуку система використовує вбудовану підтримку мікрофонів MEMS, використовуючи перетворення PDM-PCM та цифрові інтерфейси (I2S). Вилучення ознак реалізовано за допомогою бібліотеки CMSIS–DSP, яка надає оптимізовані процедури для обчислення коефіцієнтів

MFCC у режимі реального часу. Остаточний етап класифікації виконується вбудованою штучною нейронною мережею, яка перетворюється та розгортається за допомогою X–CUBE–AI, інструментарію STMicroelectronics для інтеграції навчених нейронних мереж у прошивку STM32. Цей програмний стек забезпечує повну обробку сигналів та конверс логічного висновку на пристрої з мінімальними накладними витратами ресурсів.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На основі досліджених технологій у цій роботі пропонується концепція моніторингу стану залізничної інфраструктури, інтегрована з виявленням повітряних загроз (рис. 7) [1, 5, 16]. Запропонована система використовує дві бездротові технології: ZigBee, що використовується для зв'язку на короткій відстані між сенсорними блоками в радіусі 75–100 метрів, та LoRa, що використовується для передачі на великі відстані (5–15 км) критичних, узагальнених даних, таких як аномальні події або підтверджені повітряні загрози, до центральної системи управління.

В якості кожного сенсорного блоку лежить малопотужний мікроконтролер STM32, інтерфейсований з цифровим MEMS-мікрофоном, здатним постійно контролювати акустичні сигнали. Захоплення звуку ініціюється, коли навколишній шум перевищує заздалегідь визначений поріг амплітуди, що зменшує споживання енергії та мінімізує непотрібну обробку. Після захоплення сигналу

він обробляється локально: мікроконтролер обчислює MFCC за допомогою оптимізованих процедур CMSIS–DSP, а потім виконує класифікацію загроз за допомогою вбудованої штучної нейронної мережі, розгорнутої через X–CUBE–AI.

Весь конвеєр обробки – від захоплення звуку та вилучення ознак до виведення – виконується на пристрої, без необхідності зовнішньої обробки або підключення. Ця вбудована архітектура штучного інтелекту забезпечує низьку затримку, енергоефективність та надійну роботу в польових умовах. Модульна конструкція дозволяє розширити ту саму платформу для моніторингу інших критичних параметрів залізничної інфраструктури, таких як вібрація, електричний шум або структурні аномалії, що робить її масштабованим рішенням для інтелектуальних залізничних систем наступного покоління.

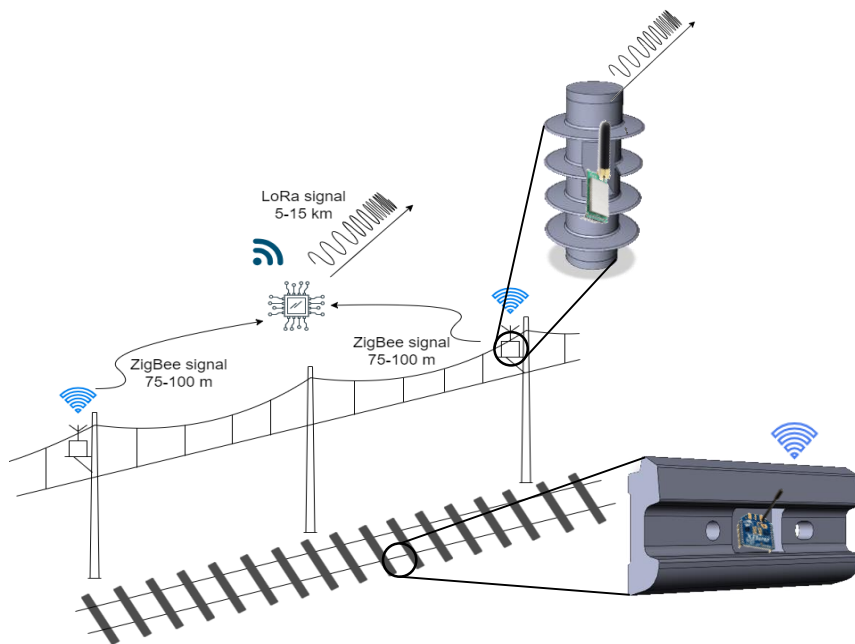


Рис. 7. Концепція моніторингу стану залізничної інфраструктури з інтегрованим виявленням повітряних загроз

Fig. 7. Concept of railway infrastructure condition monitoring with integrated aerial threat detection

Розроблена система забезпечує виявлення повітряних загроз у реальному часі шляхом акустичної ідентифікації типових сигнатур БПЛА та крилатих ракет. Встановлено, що застосування Mel-частотних кепстральних коефіцієнтів

(MFCC) як набору ознак дає можливість ефективно відокремлювати повітряні об'єкти від фонових шумів навіть за низького рівня сигналу.

Випробування прототипу з мікроконтролером STM32 та мікрофоном MEMS підтвердили

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

стабільну точність класифікації 85–90 % при обмеженому обсязі пам'яті 300–500 КіБ. Оптимальна архітектура штучної нейронної мережі (392–196–98–49–24 нейронів) забезпечила компроміс між швидкодією, точністю та енергоефективністю. Вбудований аналіз і передавання даних через ZigBee/LoRa дозволяють формувати розподілену мережу сенсорів із часом реакції до 1 с.

Отримані результати підтверджують ефективність акустичного підходу для інтеграції у системи безпеки транспортної інфраструктури, що функціонують в умовах повітряних загроз.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше розроблено концепцію вбудованої системи акустичного виявлення повітряних загроз, яка поєднує аналіз MFCC-коефіцієнтів, методи штучного інтелекту та мікроконтролерну реалізацію на STM32. Запропонований підхід забезпечує обробку сигналів без хмарних ресурсів, що підвищує стійкість системи до зовнішніх впливів і скорочує затримку відгуку.

Практичне значення роботи полягає у створенні технологічної основи для розгортання автономних сенсорних мереж на об'єктах критичної інфраструктури. Розроблені рішення можуть бути використані в системах моніторингу стану контактних мереж, оповіщення персоналу залізничних депо та тягових підстанцій, а також у комплексах оборонного спостереження.

Висновки

В цьому дослідженні пропонується нова вбудована система на основі штучного інтелекту для виявлення повітряних загроз у реальному

часі, інтегрована в ширшу систему моніторингу залізничної інфраструктури. Конструкція системи поєднує компактні MEMS-мікрофони, мікроконтролери STM32 та модулі бездротового зв'язку ZigBee для формування розподіленої мережі акустичних датчиків, здатних до локалізованого захоплення та обробки звуку. Акустичні сигнали аналізуються на пристрої з використанням Mel-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCC) як основного набору функцій, після чого проводиться класифікація за допомогою легких штучних нейронних мереж (ANN), розгорнутих за допомогою інструментарію STM32 X-CUBE-AI.

Апаратна та програмна архітектура була ретельно оптимізована для роботи в умовах обмеженої пам'яті та потужності мікроконтролерів на основі STM32. Оцінка кількох конфігурацій ANN показала, що моделі розміром 300–500 КіБ постійно досягали точності перевірки від 85 % до 90%, демонструючи надійний баланс між продуктивністю та розгортанням. Весь конвеєр виводу працює незалежно від хмарних сервісів, забезпечуючи низьку затримку відгуку та вищу стійкість системи в критичних польових умовах.

Окрім виявлення дронів, модульна структура системи дозволяє розширити її для ширших завдань моніторингу стану залізниць, таких як відстеження електричних аномалій або механічного зносу обладнання повітряних ліній. Результати підтверджують можливість розгортання акустичних класифікаторів на основі нейронних мереж у вбудованих середовищах з обмеженими можливостями, що відкриває шлях для масштабованих, інтелектуальних та автономних сенсорних рішень для захисту критичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Босий Д. О., Саблін О. І., Потапчук І. Ю. Підвищення рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури транспорту на основі геопросторового аналізу акустичних портретів повітряних загроз. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 4. С. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156>
2. Даник Ю. Г., Бугайов М. В. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2015. № 10. С. 5–20.
3. Карташов В. М., Посошенко В. О., Капуста А. І., Рибников М. В., Першин Є. В. Особливості задач виявлення і спостереження груп безпілотних літальних апаратів. *Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 211. С. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.06>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

4. Лепіх Я. І., Сантоній В. І., Будіянська Л. М., Іванченко І. О., Янко В. В. *Оптико-електронні системи ближньої локації* : монографія / за заг. ред. Я. І. Лепіха. Одеса : Одеський нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2019. 294 с.
5. Система моніторингу технічних параметрів контактної мережі електрифікованих залізниць з ідентифікацією повітряних загроз : пат. 159173 Україна : МПК H02J 1/14 (2006.01), H02J 13/00. № u201908812 ; заявл. 20.02.2025 ; опубл. 30.04.2025, Бюл. № 18. 4 с.
6. Сокольський С. О., Мовчанюк А. В. Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2021. № 87. С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.20535/radap.2021.87.46-55>
7. Сурма Ш., Лукасик Е. Моніторинг контактної мережі. *Електрифікація транспорту*. 2013. № 5. Р. 113–118.
8. Суходоля О. М., Харазішвілі Ю. М., Рябцев Г. Л. *Енергетична безпека України: перспективна модель управління ризиками* : монографія. Київ : НІСД, 2023. 152 с. DOI: <https://doi.org/10.53679/niss-book.2023.01>
9. Тихонов В. А., Карташов В. М., Олейников В. Н., Леонидов В. И., Тимошенко Л. П., Селезнев И. С., Рыбников Н. В. Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2020. № 81. С. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.20535/radap.2020.81.38-46>
10. Abishek A. S. Audio Classification Deep Learning. *GitHub*. URL: <https://github.com/abishek-as/Audio-Classification-Deep-Learning>
11. Al-Emadi S., Al-Ali A., Al-Ali A. Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Iss. 15. Art. 4953. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21154953>
12. Anti-UAV Defence System (AUDS). *Blighter*. 2018. URL: <https://blighter.com/anti-uav-defence-system-auds-unveiled-by-trio-of-british-technology-companies/>
13. Bondarenko I., Lukoševičius V., Keršys R., Neduzha L. Innovative trends in railway condition monitoring. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 77. P.10–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002>
14. Bondarenko I., Lukoševičius V., Neduzha L. Novel ‘Closed’-system approach for monitoring the technical condition of railway tracks. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Iss 8. Art. 3180. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16083180>
15. Bosyi D., Sablin O., Khomenko I., Kosariev Ye., Keбал I., Myamlin S. Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12(SE). P. 57–71. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.5>
16. Bosyi D., Sablin O., Potapchuk I. Decentralized WAMS for Railway Overhead Lines with Audio-Based Drone Detection. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv : KhPI, 2024. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61434.2024.10877981>
17. Kartashov V. M., Oleynikov V. N., Sheiko S. A., Babkin S. I., Korytsev I. V., Zubkov O. V., Anokhin M. A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, Iss. 10. P. 915–924. DOI: <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v77.i10.70>
18. Kurhan D., Kovalchuk V., Markul R., Kovalskiy D. Development of Devices for Long-Term Railway Track Condition Monitoring: Review of Sensor Varieties. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2025. Vol. 22, Iss. 4. P. 65–82. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.22.4.2025.4.5>
19. Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D. Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. № 12. P. 154–160.
20. Piczak K. J. Environmental sound classification with convolutional neural networks. *2015 IEEE 25th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*. Boston, 2015. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/mlsp.2015.7324337>
21. Revolutionising Railway Decisions. *Sensonic GmbH*. URL: <https://www.sensonic.com/>
22. Ribbing C. G. Controlling thermal radiation from surfaces. *Optical Thin Films and Coatings*, 2013. P. 357–390. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097316.2.357>
23. Sicat CMS. Catenary monitoring system for overhead contact line systems. *Siemens Mobility GmbH*, 2018. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:fc73a788-70d4-4cba-82ba-41208bcef48b/siemens-sicat-cms-pi-en.pdf>
24. Singha S., Aydin B. Automated Drone Detection Using YOLOv4. *Drones*. 2021. Vol. 5. Iss 3. Art. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5030095>

25. Sukharevsky O. *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*. Boca Raton : CRC Press, 2015. 334 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17239>
26. *The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies*. Washington, DC : The National Academies Press, 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>
27. Yaran W. Electrical interface of MEMS microphone introduction. *Infineon Knowledge Base Articles*. 2023. Jul. 11. URL: <https://community.infineon.com/t5/Knowledge-Base-Articles/Electrical-interface-of-MEMS-microphone-introduction/ta-p/453658#>
28. Zhang X., Kusrini K. Autonomous long-range drone detection system for critical infrastructure safety. *Multi-media Tools and Applications*. 2021. Vol. 80. Iss. 15. P. 23723–23743. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10231-x>

D. O. BOSYI^{1*}, O. I. SABLIN², I. Yu. POTAPCHUK³

^{1*}Dep. «Intelligent Power Supply Systems», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 25, e-mail d.o.bosyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1818-2490

²Dep. «Environmental and Civil Security», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 76, e-mail o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

³Dep. «Intelligent Power Supply Systems», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 55 25, e-mail i.y.potapchuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5985-1040

Increasing the Level of Safety and Security of Transport Infrastructure from Air Threats Based on Their Acoustic Identification

Purpose. The purpose of the study is to enhance the safety and protection of transport infrastructure through the development of an intelligent monitoring system capable of detecting and classifying aerial threats based on their acoustic characteristics. The work focuses on designing algorithms for the early recognition of unmanned aerial vehicles (UAVs) and cruise missiles near critical infrastructure, addressing the growing importance of autonomous safety systems under hybrid threat conditions. **Methodology.** The research applies a comprehensive approach combining digital signal processing, machine learning, and embedded computing. Acoustic signatures of aerial targets were analyzed in MatLab using Audio Toolbox and DSP System Toolbox. Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) were used as primary features to capture the most informative frequency components. The artificial neural network model was optimized for STM32 microcontrollers and implemented using CMSIS-DSP and X-CUBE-AI libraries. Wireless data exchange between sensor nodes employed ZigBee and LoRa protocols, ensuring scalable and energy-efficient communication. **Findings.** The system provides real-time acquisition, processing, and classification of acoustic signals with an accuracy of 85–90%. The MEMS-based sensor node prototype performs fully local processing without cloud services. **Originality.** For the first time, a concept integrating acoustic identification of aerial threats into transport infrastructure monitoring has been developed using embedded artificial intelligence, on-device learning, and local decision-making capabilities. **Practical value.** The results can be used to create distributed early-warning systems, upgrade contact line and infrastructure monitoring, and strengthen technological autonomy in defense and transport security applications.

Keywords: railway; infrastructure; electrification; contact network; monitoring; safety; acoustic identification; air threats; microcontroller computing; low-frequency cepstral coefficients; neural network

REFERENCES

1. Bosyi, D. O., Sablin, O. I., & Potapchuk, I. Yu. (2024). Increasing the security of critical transport infrastructure facilities based on geospatial analysis of acoustic signatures of aerial threats. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4, 147-156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156> (in Ukrainian)
2. Danyk, Yu. H., & Buhaiiov, M. V. (2015). Analysis of the efficiency of detecting tactical unmanned aerial vehicles by passive and active observation means. *Problems of Development, Testing, and Operation of Complex Information Systems*, 10, 5-20. (in Ukrainian)
3. Kartashov, V. M., Pososhenko, V. O., Kapusta, A. I., Rybnikov, M. V., & Pershyn, Ye. V. (2022). Features of detecting and observing groups of unmanned aerial vehicles. *Radiotekhnika*, 211, 84-92. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.06> (in Ukrainian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

4. Lepikh, Ya. I., Santonii, V. I., Budiianska, L. M., Ivanchenko, I. O., & Yanko, V. V. (2019). *Optyko-elektronni systemy blyznoi lokatsii*. Odesa: Odesa National University named after I. I. Mechnikov. (in Ukrainian)
5. Bosyi, D. O., Sablin, O. I., & Potapchuk, I. Yu. (2025). *Systema monitorynhu tekhnichnykh parametriv kontaktnoi mrezih elektryfikovanykh zaliznyts z identyfi-katsiieiu povitrianykh zahroz* (Patent № 159173, Ukraine). Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
6. Sokolskyi, S. O., & Movchaniuk, A. V. (2021). Overview of Detection and Localization Methods of Small Unmanned Aerial Vehicles. *Visnyk NTUU KPI Serii. Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, 87, 46-55. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55> (in Ukrainian)
7. Surma, S., & Lukasik, J. (2013). Contact network monitoring. *Electrification of Transport*, 5, 113-118. (in Russian)
8. Sukhodolia, O. M., Kharazishvili, Yu. M., & Riabtsev, H. L. (2023). *Enerhetychna bezpeka Ukrainy: perspektyvna model upravlinnia ryzykamy*. Kyiv: NISS. DOI: <https://doi.org/10.53679/niss-book.2023.01> (in Ukrainian)
9. Tykhonov, V. A., Kartashov, V. M., Oleinikov, V. M., Leonidov, V. I., Timoshenko, L. P., Seleznev, I. S., & Rybnikov, M. V. (2020). Detection-Recognition of Unmanned Aerial Vehicles using the Composed Auto-Regression Model of their Acoustic Radiation. *Visnyk NTUU KPI Serii. Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, 81, 38-46. DOI: <https://doi.org/10.20535/radap.2020.81.38-46> (in Russian)
10. Abishek, A. S. (2023). Audio Classification Deep Learning. *GitHub*. Retrieved from: <https://github.com/abishek-as/Audio-Classification-Deep-Learning> (in English)
11. Al-Emadi, S., Al-Ali, A., & Al-Ali, A. (2021). Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks. *Sensors*, 21(15), 4953. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21154953> (in English)
12. Anti-UAV Defence System (AUDS). (2018). *Blighter*. Retrieved from: <https://blighter.com/anti-uav-defence-system-auds-unveiled-by-trio-of-british-technology-companies/> (in English)
13. Bondarenko, I., Lukoševičius, V., Keršys, R., & Neduzha, L. (2024). Innovative trends in railway condition monitoring. *Transportation Research Procedia*, 77, 10-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002> (in English)
14. Bondarenko, I., Lukoševičius, V., & Neduzha, L. (2024). Novel ‘Closed’-system approach for monitoring the technical condition of railway tracks. *Sustainability*, 16(8), 3180. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16083180> (in English)
15. Bosyi, D., Sablin, O., Khomenko, I., Kosariev, Ye., Keбал, I., & Myamlin, S. (2017). Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems. *Transport Problems*, 12(SE), 57-71. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.5> (in English)
16. Bosyi, D., Sablin, O., & Potapchuk, I. (2024). Decentralized WAMS for Railway Overhead Lines with Audio-Based Drone Detection. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. (pp. 1-6), Kharkiv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61434.2024.10877981> (in English)
17. Kartashov, V. M., Oleynikov, V. N., Sheiko, S. A., Babkin, S. I., Korytsev, I. V., Zubkov, O. V., & Anokhin, M. A. (2018). Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(10), 915-924. DOI: <https://doi.org/10.1615/telecom-radeng.v77.i10.70> (in English)
18. Kurhan, D., Kovalchuk, V., Markul, R., & Kovalskyi, D. (2025). Development of Devices for Long-Term Railway Track Condition Monitoring: Review of Sensor Varieties. *Acta Polytechnica Hungarica*, 22(4), 65-82. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.22.4.2025.4.5> (in English)
19. Mizan, M., Karwowski, K., & Karkosiński, D. (2013). Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12, 154-160. (in Polish)
20. Piczak, K. J. (2015). Environmental sound classification with convolutional neural networks. *2015 IEEE 25th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*. (pp. 1-6.), Boston, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/mlsp.2015.7324337> (in English)
21. Revolutionising Railway Decisions. (2018). *Sensonic GmbH*. Retrieved from: <https://www.sensonic.com/> (in English)
22. Ribbing, C. G. (2013). Controlling thermal radiation from surfaces. In: *Optical Thin Films and Coatings*. 357-390. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097316.2.357> (in English)
23. Sicat CMS. (2018). Catenary monitoring system for overhead contact line systems. *Siemens Mobility GmbH*. Retrieved from: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:fc73a788-70d4-4cba-82ba-41208bcef48b/siemens-sicat-cms-pi-en.pdf> (in English)

-
24. Singha, S., & Aydin, B. (2021). Automated drone detection using YOLOv4. *Drones*, 5, 95.
DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5030095> (in English)
25. Sukharevskiy, O. (2015). *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*. Boca Raton: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17239> (in English)
26. (2016). *The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies*. Washington, DC : The National Academies Press.
DOI: <https://doi.org/10.17226/21712> (in English)
27. Yaran, W. (2023, July 11). Electrical interface of MEMS microphone introduction. *Infineon Knowledge Base Articles*. Retrieved from: <https://community.infineon.com/t5/Knowledge-Base-Articles/Electrical-interface-of-MEMS-microphone-introduction/ta-p/453658#> (in English)
28. Zhang, X., & Kusriani, K. (2021). Autonomous long-range drone detection system for critical infrastructure safety. *Multimedia Tools and Applications*, 80(15), 23723-23743.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10231-x> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.08.2025

Прийнята до друку: 22.12.2025

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.162-027.45

М. Б. КУРГАН^{1*}, Р. В. ІВАНОВ²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

Особливості будівництва переїздів при застосуванні суміщеної колії (1 520/1 435 мм) на мережі залізниць України

Мета. Обґрунтування та розробка технічних рішень для будівництва залізничних переїздів на суміщеній колії 1 520/1 435 мм з урахуванням сучасних технологій та вимог експлуатації на мережі залізниць України. Недостатність уніфікованих та оптимізованих рішень стримує темпи впровадження суміщеної колії на ключових ділянках мережі. Для вирішення цього завдання проведено аналіз існуючих світових та вітчизняних нормативних документів щодо будівництва переїздів на суміщеній колії; розглянуто та порівняні різні технологічні рішення та матеріали для переїзних настилів (гумово-кордні, залізобетонні, комбіновані), оцінено їхні експлуатаційні та економічні характеристики. **Методика.** Для вибору найбільш раціонального варіанту конструкції переїзного настилу у роботі використано методи системного аналізу, а також метод аналізу ієрархій (МАІ) для обґрунтування технічних рішень. Методика передбачає дослідження особливостей будівництва переїздів на суміщеній колії вибір оптимальних матеріалів та технологій, що здатні забезпечити безпеку, надійність та економічну ефективність для успішної інтеграції української залізниці до європейської системи. **Результати.** Проведено побудову ієрархії критеріїв, їх попарне порівняння, розрахунок вагових коефіцієнтів і комплексну оцінку альтернатив. Застосування МАІ дозволило визначити пріоритетність різних типів переїзних настилів за критеріями довговічності, вартості, стійкості до вібрації, шумопоглинання, складністю ремонту надати рекомендації щодо впровадження сучасних технологій будівництва переїздів на мережі залізниць України. **Наукова новизна.** В роботі вперше в рамках українських реалій проведено системний аналіз та оцінку ефективності сучасних типів переїзних настилів для суміщеної колії, включаючи використання МАІ для багатокритеріального вибору. **Практичне значення.** Результати роботи можуть бути використані технічними та проектними підрозділами Укрзалізниці при розробці та впровадженні проектів на ділянках із суміщеною колією, виробниками елементів верхньої будови колії для адаптації своєї продукції до сучасних вимог, проектними організаціями для обґрунтування вибору технологічних рішень.

Ключові слова: суміщена колія; залізничний переїзд; переїзний настил; метод аналізу ієрархій; Укрзалізниця; будівництво; експлуатаційна надійність

Вступ

В умовах глобалізації та поглиблення економічної інтеграції України до Європейського Союзу, залізничний транспорт відіграє критично важливу роль у забезпеченні ефективних логістичних ланцюгів. Ключовим стратегічним завданням для залізничної галузі України є гармонізація з європейською залізничною мережею, яка функціонує на стандартній ширині

колії 1 435 мм, тоді як українська мережа історично використовує ширину 1 520 мм.

Впровадження суміщеної колії є одним з найбільш раціональних та економічно вигідних шляхів вирішення цієї проблеми, оскільки дозволяє забезпечити безперервний рух рухомого складу обох стандартів без необхідності перевантаження вантажів або зміни візків на прикордонних переходах. Проте, впровадження суміщеної колії на існуючій мережі супрово-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

джується низкою технологічних викликів, серед яких особливе місце посідає проблематика залізничних переїздів. Дослідження [4] зосереджене на процесах функціонування небезпечних транспортних об'єктів – залізничних переїздів з різною інтенсивністю та параметрами перевезення, які потребують вирішення широкого кола теоретичних, практичних та організаційних завдань. Переїзди є критично важливими елементами залізничної інфраструктури, що забезпечують перетин колії з автомобільною дорогою, і їхня конструкція на суміщеній колії перетворюється на «вузьке місце» всього проекту.

На відміну від одноколійної системи, де переїзний настил має лише два канали для реборд коліс, суміщена колія вимагає розміщення чотирьох рейок та формування відповідної системи жолобів. Це значно ускладнює конструкцію настилу, збільшує кількість стиків та вимагає високої точності при монтажі, щоб забезпечити безпечний прохід колісних пар обох типів. Неправильно спроектований або змонтований переїзд із суміщеною колією становить підвищений ризик як для залізничного, так і для автомобільного транспорту. Це вимагає використання передових, довговічних та зносостійких матеріалів, що забезпечують ідеально рівну поверхню.

Хоча в Україні вже є певний досвід улаштування суміщеної колії, існуючі технічні стандарти потребують оновлення та доповнення з урахуванням сучасних технологій, що довели свою ефективність у світі (наприклад, модульні системи з еластомерних матеріалів). Недостатність уніфікованих та оптимізованих рішень стримує темпи впровадження суміщеної колії на ключових ділянках мережі.

З огляду на вищезазначене, дослідження особливостей будівництва переїздів на суміщеній колії є відповідальним науково-практичним завданням. Вибір оптимальних матеріалів та технологій, що здатні забезпечити безпеку, надійність та економічну ефективність, є критично важливим для успішної інтеграції української залізниці до європейської системи.

Мета

Метою дослідження є обґрунтування та розроблення технічних рішень щодо будівництва залізничних переїздів на суміщеній колії 1 520/1 435 мм з урахуванням сучасних техно-

логій та експлуатаційних вимог на мережі залізниць України. Недостатність уніфікованих та оптимізованих конструктивних рішень наразі стримує темпи впровадження суміщеної колії на ключових напрямках залізничної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз чинних вітчизняних та міжнародних нормативних документів, що регламентують будівництво переїздів на суміщеній колії. Розглянуто й порівняно різні типи переїзних настилів – гумово-кордні, залізобетонні та комбіновані, а також виконано оцінку їхніх експлуатаційних, технологічних і економічних характеристик.

Методика

При застосуванні суміщеної колії 1 520/1 435 мм на залізничних переїздах виникають технічні виклики, пов'язані з різною шириною колій та безпекою руху автотранспорту. Основні проблеми: різна відстань між рейками, що ускладнює конструкцію настилу переїзду; необхідність надійної роботи переїзного покриття при проїзді важкого автотранспорту; стабільність ізоляції колії для роботи сигналізації.

Методика передбачає дослідження особливостей будівництва переїздів на суміщеній колії вибір оптимальних матеріалів та технологій, що здатні забезпечити безпеку, надійність та економічну ефективність для успішної інтеграції української залізниці до європейської системи. Для вибору найбільш раціонального варіанту конструкції переїзного настилу в роботі використано методи системного аналізу, а для обґрунтування технічних рішень – метод аналізу ієрархій (МАІ).

Будівництво залізничних переїздів на суміщеній колії (1 520/1 435 мм) в умовах української залізничної мережі супроводжується низкою конструктивних, технологічних і експлуатаційних особливостей. Основна мета такого будівництва – забезпечення безпечного та ефективного перетину залізничних колій автомобільними шляхами, який передбачає рух поїздів двома типами колійної ширини (табл. 1).

АТ «Укрзалізниця» (УЗ) має намір побудувати двоколійну залізницю до кордону з Польщею. Це дозволить компанії запустити прямі поїзди з України до Європейського Союзу без заміни візків. 70-кілометровий маршрут буде

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

переобладнано зі звичайної ширококоліїної залізниці 1 520 міліметрів на двоколіїну лінію шляхом додавання паралельних колій для колії 1 435 мм (рис. 1) [11].



Рис. 1. Двоколіїна ділянка:
зліва – суміщена колія 1 520/1 435 мм)

Fig. 1. Double-track section:
on the left – dual-gauge track 1520/1435 mm

На окремих ділянках залізниць вже використовується суміщена колія (1 520/1 435 мм). Наприклад, на станції Мостиська 1 є комбінована колія, що дозволяє обробляти пасажирські та вантажні поїзди, що рухаються з Польщі без заміни візків. Після проходження прикордонного переходу Мостиська – Медика та в'їзду до Польщі використовуються існуючі лінії з шириною колії 1 435 мм. Довжина суміщених колій на ділянці Хирів–Нижанковичі становить близько 24 км [8].

Таблиця 1

Конструктивні, технологічні і експлуатаційні особливості будівництва залізничних переїздів на суміщеній колії (1 520/1 435 мм)

Table 1

Structural, technological and operational features of railway level crossing construction on dual-gauge track (1520/1435 mm)

1. Конструктивні особливості
1.1 Тип рейкової решітки: для суміщеної колії на переїздах використовуються спеціальні конструкції, які дозволяють укласти чотири рейкові нитки, забезпечуючи стабільну ширину обох колій – 1 520 мм і 1 435 мм.
1.2 Колія: потрібно передбачити підвищені вимоги до геометричної точності укладання рейок, особливо в зоні переїзного настилу, де відбувається перетин із автодорогами.
1.3 Настил переїзду: використовуються модульні переїзні настили, які сумісні з багаторейковими системами, наприклад, гумово-кордні або залізобетонні плити з фрезерованими каналами для розміщення рейок на різній ширині.
2. Технологічні особливості будівництва
2.1 Підготовчі роботи: через ускладнення конструкції на суміщеній колії передбачається реконструкція земляного полотна з урахуванням нових габаритів і дренажу.
2.2 Укладання рейок: застосовується кріплення типу «FASTCLIP», «W14» або аналогічні, які мають бути адаптовані для суміщеної конфігурації колії.
2.3 Сигналізація і автоматика: необхідно переобладнати пристрої переїзної сигналізації для виявлення поїздів, що рухаються по колії 1 520 і 1 435 мм.
3. Експлуатаційні особливості
3.1 Деформації та знос: через складну геометрію і збільшене навантаження на окремі елементи (особливо на внутрішню рейку) зростають ризики зносу і потреба у частішому технічному обслуговуванні.

3.2 Обмеження швидкості: для руху поїздів по переїздах суміщеної колії можуть тимчасово вводитися обмеження швидкості.

3.3 Безпека руху: рівень безпеки зростає за рахунок застосування активних систем оповіщення водіїв автомобілів, встановлення шлагбаумів із покращеним приводом, а також додаткових огорожень.

4. Нормативне та правове забезпечення

4.1 В Україні застосовуються при проектуванні переїздів із суміщеною колією адаптовані положення з ДБН В.2.3–19:2018 та стандарт Укрзалізниці СТП 02.01–002:2023, а також досвід європейських країн, де аналогічні об'єкти вже впроваджено.

Традиційні технології будівництва, такі як асфальтування або укладання дерев'яного настилу, є неефективними для багаторейкових систем, оскільки не можуть забезпечити необхідну точність та довговічність. Це призводить до високих експлуатаційних витрат, частих ремонтів і, як наслідок, до необхідності закриття переїзду, що створює значні незручності для автомобільного руху.

Серед питань, що стосуються конструктивних особливостей, розглянемо основні підходи до облаштування переїздів на суміщеній колії. В багатьох країнах використовуються модульні переїзні настили, які сумісні з багаторейковими системами, наприклад, з еластомерних плит, таких як ГВП, STRAIL або комбіновані системи «гума+бетон», гумово-кордні або залізобетонні плити з фрезерованими каналами для розміщення рейок на різній ширині. (п. 1.3, табл. 1).

Гумові рішення та компоненти для залізничних переїздів – це перевірена елементна система, яка використовується по всій Європі [9]. Підходить як для пішоходів з невеликим рухом, так і для інтенсивного руху транспорту (рис. 2).



Рис. 2. Система гумових плит на переїзді

Fig. 2. Rubber slab system at the level crossing

Для поширення сучасних практик та вимог щодо розробки інженерних рішень для переїздів між автомагістралями та залізницями використовується «Довідник з переїздів» [6].

Так, переїзні настили STRAIL (Німеччина) широко використовуються на залізничних переїздах із суміщеною колією (1 520/1 435 мм). Мають високу довговічність, зменшують шум та вібрації, але дорожчі у виробництві. Наведена на рис. 3 модульна система STRAIL складається з окремих суцільних гумових панелей, які з'єднані між собою за допомогою герметичної замкової системи, підходить для будь-якого типу рейок та шпал, забезпечує тривалий термін служби, швидко та легко встановлення та видалення.



Рис. 3. Система залізничних переїздів STRAIL

Fig. 3. STRAIL railway level crossing system

Переїзди з еластомерних плит – спеціальні конструкції залізничних переїздів представлено в роботі [10] (рис. 4).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

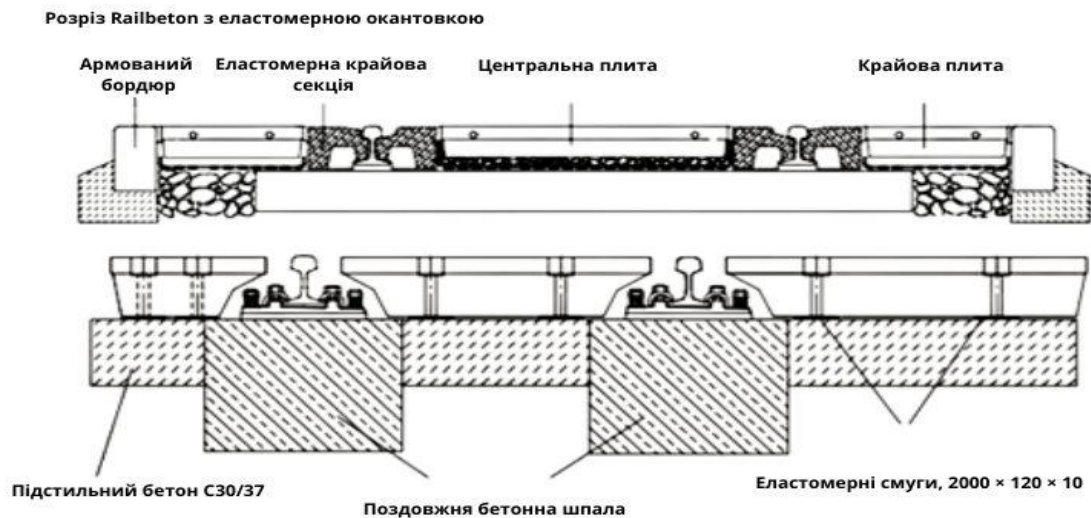


Рис. 4. Еластомерна крайова секція переїзду

Fig. 4. Elastomer edge section of the level crossing

В журналі [5] представлена інтелектуальна система, що інтегрує модулі, які мають особливе значення для безпеки залізничних переїздів

Підводячи підсумки короткого огляду конструкцій переїздів, слід зазначити, що на залізницях широко застосовуються сучасні системи покриття залізничних переїздів, які складаються з окремих готових елементів (модулів), що укладаються між рейками, збоку від них та на підходах до переїзду. Вони прийшли на зміну традиційним асфальтобетонним або дерев'яним настилам. Як правило, такі настили виготовляються з гумово-кордних або залізобетонних матеріалів. Основні переваги модульності:

- швидкість монтажу: модулі виготовляються на заводі, що значно прискорює укладання їх на місці;
- висока якість: заводське виробництво забезпечує точність розмірів та якість матеріалів;
- довговічність: використання міцних матеріалів, стійких до навантажень та атмосферних впливів;
- легкість заміни: у разі пошкодження замінюється лише пошкоджений модуль, а не весь настил;
- зниження шуму та вібрації: гумові компоненти, зокрема, можуть зменшувати шум від проїзду автомобілів.

Для переїздів на суміщеній колії, де потрібна висока точність і складні форми вирізів, виробництво як гумових, так і залізобетонних

плит буде складнішим і, відповідно, дорожчим, ніж для стандартних переїздів. Вибір залежить від конкретних вимог проєкту, інтенсивності руху, бюджету та пріоритетів (наприклад, чи важливіший комфорт для пасажирів автотранспорту, чи довговічність переїзного настилу).

Вартість та довговічність різних типів переїзних настилів залежать від багатьох факторів (виробник, конкретна модифікація, інтенсивність руху, умови експлуатації, якість монтажу тощо) (табл. 2).

Як випливає з аналізу табл. 2, проблематика залізничних переїздів на суміщеній колії проявляється в необхідності урахування різноманітних, інколи суперечливих вимог: конструктивна складність, вимоги до безпеки, експлуатаційні вимоги, вартість, відсутність універсальних рішень. Вибір оптимальних матеріалів та технологій, що здатні забезпечити безпеку, надійність та економічну ефективність, є критично важливим для успішної інтеграції української залізниці до європейської системи. Для вирішення такого науково-практичного завдання в роботі застосовано МАІ, який дозволяє систематизувати складні рішення, що включають багато критеріїв, і застосувати бальну оцінку для вибору найкращої альтернативи.

Відповідно до табл. 2 метою дослідження є вибір оптимального типу покриття залізничного переїзду. Критеріями будуть «характеристики» з таблиці: довговічність, початкова вар-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

тість, вартість монтажу, стійкість до вібрації/удару, шумопоглинання, комфорт проїзду авто, складність ремонту. Альтернативами ви-

ступають «види плит»: гумово-кордні плити, залізобетонні плити, еластомерні плити і комбіновані системи (табл. 3).

Таблиця 2

Узагальнене співвідношення різних типів переїзних настилів

Table 2

General correlation of different types of level crossing decks

Характеристика	Гумово-кордні плити (суцільно-гумові)	Залізобетонні плити (монолітні/збірні)	Еластомерні плити (наприклад, STRAIL, ГВР)	Комбіновані системи (гума+бетон)
Матеріал	Високоміцна гума, армована кордом	Залізобетон	Спеціальні еластомерні суміші	Залізобетонна основа + гумовий/полімерний верхній шар
Довговічність (років)	10...20	20...40+	15...25+	20...30+ (верхній шар може вимагати заміни раніше)
Початкова вартість (матеріал/м ²)	Вища (порівняно з ЗБ)	Середня/Нижча	Вища (часто найвища)	Вища (може конкурувати з еластомерними)
Вартість монтажу	Нижча (легкі)	Вища (важкі, потрібен кран)	Нижча (модульна, легка)	Середня/Вища (залежить від ваги модулів)
Стійкість до вібрації/удару	Дуже висока	Середня/Нижча (жорсткі, схильні до тріщин)	Дуже висока	Висока (гумовий шар амортизує)
Шумопоглинання	Дуже висока	Нижча	Дуже висока	Висока (гумовий шар поглинає)
Комфорт проїзду авто	Високий (рівна, еластична поверхня)	Середній (жорсткий, можливі нерівності)	Високий	Високий
Складність ремонту	Простий (заміна модуля)	Складний (бетонування, демонтаж)	Простий (заміна модуля)	Заміна верхнього шару/модуля, основа довговічна
Вага модулів	Легкі	Дуже важкі	Легкі	Важчі за чисту гуму, легші за чистий бетон
Адаптація для суміщеної колії	Дуже добре (точне фрезерування каналів)	Добре (складне відливання/фрезерування)	Відмінно (розроблені для складних конфігурацій)	Добре/Відмінно (комбінація міцності та точності)

Критерії й альтернативи й для вибору типу покриття залізничного переїзду

Table 3

Criteria and alternatives for selecting the type of railway level crossing deck

Критерії		Альтернативи	
K1	Довговічність	A1	Гумово-кордні плити
K2	Початкова вартість	A2	Залізобетонні плити
K3	Вартість монтажу	A3	Еластомерні плити (STRAIL, ГВР)
K4	Стійкість до вібрації/удару	A4	Комбіновані системи («гумка+бетон»)
K5	Шумопоглинання		
K6	Комфорт проїзду авто		
K7	Складність ремонту		

Результати

Для досягнення поставленої мети розглянуто й порівняно різні типи переїзних настилів, а також виконано оцінку їхніх експлуатаційних, технологічних і економічних характеристик.

Використання МАІ дозволяє враховувати співвідношення різних типів переїзних настилів (табл. 2). Виконання розрахунків передбачає таку послідовність:

1. Визначення мети – вибір оптимального типу покриття залізничного переїзду.

2. Визначення критеріїв – це «характеристики» з табл. 2: довговічність, початкова вартість, вартість монтажу, стійкість до вібрації/удару, шумопоглинання, комфорт проїзду авто, складність ремонту

3. Визначення альтернатив - це види плит: гумово-кордні плити, залізобетонні плити, еластомерні плити, комбіновані системи

4. Побудова ієрархії. При побудові ієрархій враховано такі три рівні:

1) верхній рівень – вибір оптимального покриття;

2) середній рівень – критерії (довговічність, вартість, стійкість, тощо);

3) нижній рівень – альтернативи (гумово-кордні, залізобетонні тощо).

5. Попарне порівняння критеріїв. Необхідно порівняти кожен критерій з кожним іншим за шкалою МАІ, щоб визначити їхню вагомість (важливість). При цьому керуємося чітко ви-

значеною шкалою інтенсивності важливості (шкалою Сааті), що допомагає перевести суб'єктивні судження експерта у кількісні значення. Шкала має такі основні рівні:

1 – рівна важливість (два критерії мають однакове значення);

3 – помірна перевага (один критерій помірно важливіший за інший);

5 – сильна перевага (один критерій сильно важливіший за інший);

7 – дуже сильна перевага (один критерій дуже сильно важливіший за інший);

9 – абсолютна перевага (один критерій абсолютно важливіший за інший).

2, 4, 6, 8 – проміжні значення, що використовуються для тоншої градації. Зворотні значення (1/3, 1/5 і т. д.) використовуються, якщо порівняння йде у зворотному порядку.

6. Попарне порівняння альтернатив за кожним критерієм. Порівнюємо кожен альтернативу з іншою, але вже в межах кожного окремого критерію. Наведемо приклад порівняння за критерієм «Довговічність» (табл. 4). Експертні судження:

– залізобетонні плити (A2) є сильно довговічнішими, ніж гумово-кордні (A1) → 5;

– залізобетонні (A2) є помірно довговічнішими, ніж комбіновані (A4) → 3;

– комбіновані системи (A4) є помірно довговічнішими, ніж еластомерні (A3) → 3;

– еластомерні (A3) є помірно довговічнішими, ніж гумово-кордні (A1) → 3;

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- залізобетонні (A2) є дуже сильно довговічнішими, ніж еластомерні (A3) → 7;
- комбіновані (A4) є помірно довговічнішими, ніж гумово-кордні (A1) → 3.

Цей процес повторюється для всіх критеріїв.

7. Синтез результатів. Обчислюємо загальний пріоритет для кожної альтернативи. Це робиться шляхом множення вектора вагомості критеріїв на матрицю пріоритетів альтернатив.

Результатом буде єдиний вектор, де кожна альтернатива отримує свій загальний бал. Альтернатива з найвищим балом буде вважатися найбільш оптимальним рішенням.

Докладний опис використання МАІ при вирішенні різних завдань розглянуто в роботах авторів [2, 7]. Тому в цій статті зупинимося на аналізі остаточних результатів.

Таблиця 4

Матриця попарних порівнянь за критерієм «Довговічність»

Table 4

Pairwise comparison matrix by the criterion «Durability»

Альтернатива	A1 (Гума)	A2 (ЗБ)	A3 (Еластомер)	A4 (Комбіновані)
A1 (Гума)	1	1/5	1/3	1/3
A2 (ЗБ)	5	1	7	3
A3 (Еластомер)	3	1/7	1	1/3
A4 (Комбіновані)	3	1/3	3	1

Розрахунок локальних пріоритетів (ваг) виконується за методом геометричного середнього. Геометричне середнє є найбільш відповідним і широко прийнятим методом для розрахунку локальних пріоритетів у методі аналізу ієрархій. Воно дозволяє коректно перевести суб'єктивні судження про відносні переваги в кількісні ваги, зберігаючи при цьому логіку попарних порівнянь.

Покажемо на прикладі розрахунку середнього геометричного (ГС) для першого рядка (табл. 4):

$$ГС \text{ для } A1 = \sqrt[4]{1 \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3}} = \sqrt[4]{\frac{1}{45}} \approx 0,386$$

Аналогічно розраховані показники ГС для інших альтернатив:

$$ГС \text{ для } A2 = \sqrt[4]{5 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 3} = \sqrt[4]{105} \approx 3,201$$

$$ГС \text{ для } A3 = \sqrt[4]{3 \cdot \frac{1}{7} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3}} = \sqrt[4]{\frac{1}{7}} \approx 0,615$$

$$ГС \text{ для } A4 = \sqrt[4]{3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 1} = \sqrt[4]{3} \approx 1,316$$

Сума ГС: $0,386+3,201+0,615+1,316=5,518$.

Нормалізовані ваги (Локальні пріоритети):

A1 (Гума): $0,386/5,518 \approx 0,070$;

A2 (ЗБ): $3,201/5,518 \approx 0,580$;

A3 (Еластомер): $0,615/5,518 \approx 0,111$;

A4 (Комбіновані): $1,316/5,518 \approx 0,238$.

Таким чином, за критерієм «Довговічність» залізобетонні плити (A2) є абсолютним лідером, що відповідає попереднім висновкам.

Для оцінки особливостей будівництва переїздів на мережі залізниць України при застосуванні суміщеної колії (1 520/1 435 мм) необхідний мультидисциплінарний підхід. Критично важливими для достовірності та об'єктивності результатів будь-якого експертного оцінювання є правильний підбір складу експертів. Існують рекомендації та найкращі практики щодо оптимальної кількості експертів та їхнього фахового складу. Щоб уникнути суб'єктивного впливу однієї особи, зазвичай рекомендується не менше 3–5 експертів. Найчастіше вважається, що оптимальна кількість експертів становить від 7 до 15 осіб. У цій межі група є достатньо пред-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ставницькою для охоплення різних точок зору, але ще не настільки великою, щоб ускладнити процес взаємодії чи досягнення консенсусу.

У випадку проведення цього дослідження експерти мають представляти різні галузі та мати глибокі знання у відповідних сферах (табл. 5).

Таблиця 5

Фаховий склад експертів для отримання достовірних і об'єктивних результатів у методі аналізу ієрархії (MAI)

Table 5

Professional composition of experts for obtaining reliable and objective results in the Analytic Hierarchy Process (AHP)

Експерти, що представляють різні галузі	Спеціалізація	Значення
1. Залізничні колійники (Інженери колії):	Проектування, будівництво, утримання та експлуатація залізничної колії, верхньої будови колії, зокрема стрілочних переводів, переїздів.	Розуміють специфіку навантажень, взаємодії колесо-рейка, вимоги до геометрії колії, особливості роботи на переїздах. Вони можуть оцінити довговічність, стійкість до вібрацій, ремонтно-придатність різних конструкцій.
2. Фахівці з будівництва та проектування інфраструктури (Цивільні інженери, що спеціалізуються на дорогах та мостах):	Проектування та будівництво автомобільних доріг, асфальтобетонних покриттів, конструкцій переїздів, дренажних систем.	Можуть оцінити комфорт проїзду автомобілів, стійкість настилу до дорожнього руху, питання дренажу та інтеграції з дорожнім полотном.
3. Фахівці з експлуатації та утримання залізниць:	Щоденна експлуатація залізничних ділянок, планування «вікон», організація ремонтних робіт, управління витратами на утримання.	Нададуть цінну інформацію про реальну вартість монтажу (враховуючи час простою, необхідність техніки), складність ремонту, а також про вплив різних типів настилів на поточні експлуатаційні витрати.
4. Спеціалісти з безпеки руху поїздів та автомобільного транспорту:	Аналіз ризиків, розробка стандартів безпеки, розслідування інцидентів.	Можуть оцінити рівень безпеки, який забезпечує той чи інший тип настилу, особливо на суміщеній колії, де є ускладнюючі фактори.
5. Економісти / Фахівці з закупівель (для інфраструктурних проєктів):	Аналіз витрат-вигод, розрахунок життєвого циклу проєкту, вартість матеріалів, логістика.	Допоможуть з об'єктивною оцінкою початкової вартості матеріалів, вартості монтажу, а також довгострокових економічних показників.

Завдання фасилітатора, який проводить сесію з MAI, допомогти експерту чітко визначити ступінь переваги одного критерію над іншим, використовуючи точні формулювання шкали Сааті, щоб уникнути суб'єктивності та забезпе-

чити узгодженість суджень. В рамках аналізу переїзних настилів експерти визначили такі глобальні ваги критеріїв (табл. 6), що дало можливість отримати порівняння для різних варіантів (табл. 7).

Таблиця 6

Варіанти глобальної ваги критеріїв

Table 6

Variants of the global weight of criteria

Критерій	Вага (глобальний пріоритет)		
	1-й варіант	2-й варіант	3-й варіант
Довговічність	0,40	0,05	0,25
Вартість монтажу	0,15	0,35	0,20
Стійкість до вібрації	0,20	0,05	0,15
Шумопоглинання	0,10	0,05	0,10
Комфорт проїзду авто	0,10	0,10	0,15
Складність ремонту	0,05	0,40	0,15
Сума	1,00	1,00	1,00

Таблиця 7

Підсумкове порівняння трьох варіантів

Table 7

Final comparison of three options

Варіант	Пріоритети	1-е місце	2-е місце	3-е місце	4-е місце
Варіант 1	Важлива «Довговічність»	Еластомер (0,288)	Залізобетон (0,284)	Гума (0,241)	Комбіновані (0,188)
Варіант 2	Важливі «Монтаж/Ремонт»	Еластомер (0,398)	Гума (0,362)	Комбіновані (0,165)	Залізобетон (0,076)
Варіант 3	Збалансований	Еластомер (0,340)	Гума (0,280)	Залізобетон (0,195)	Комбіновані (0,185)

Висновок на основі даних табл. 7. Альтернатива А3 (Еластомерні плити) демонструє виняткову стійкість і стабільність лідерства незалежно від зміни пріоритетів. У всіх трьох сценаріях вона займає перше місце. Це свідчить про те, що цей варіант є найбільш універсальним та оптимальним, оскільки його переваги (комфорт, низький рівень шуму, простота монтажу/ремонту) є достатньо вагомими, щоб переважати навіть тоді, коли інші критерії (як-от довговічність) отримують високу вагу.

Альтернатива А1 (Гумово-кордні плити) є сильним «другим» номером. Вона посідає друге місце в двох з трьох варіантів, що робить її дуже надійною альтернативою.

Альтернатива А2 (Залізобетонні плити) посідає друге місце лише в першому сценарії, де «Довговічність» є найважливішим критерієм.

Це підтверджує, що цей варіант є цільовим і буде оптимальним лише за дуже специфічних умов, де вага інших критеріїв є низькою.

Проведений аналіз ієрархій показав, що для переїзду на суміщеній колії вибір типу настилу не є очевидним. Однак, використовуючи структурований підхід та аналізуючи різні сценарії, можна з високою ймовірністю визначити найбільш оптимальне рішення.

Дніпровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» розроблює стандарт і конструкцію переїздів з універсальним залізобетонним настилом через залізничні колії з рейками типу Р65 та UIC60. Стандарт застосовують при проектуванні переїзду з універсальним залізобетонним настилом через заліз-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ничні колії, його поточному утриманні та ремонті.

Переїзний настил складається з окремих залізобетонних плит та балок, виробів

комплектуючих, шпал мостових під плити переїзду та рейкової колії з роздільним клемно-болтовим скріпленням типу КБ. В шпалах вбудовані дюбелі виготовлені із поліетилену низького тиску для прикріплення за допомогою шурупів плит переїзного та пішохідного настилів до шпал (рис. 5).

Роботи з улаштування переїзного настилу виконуються в два етапи: підготовчий та основний. Основні роботи виконуються у «вікно» згідно з вимогами ЦП–0273, а саме: демонтаж рейко-шпальної решітки існуючого переїзду, укладання рейко-шпальної решітки зі шпалами мостовими під плити універсального переїзду, виправлення колії у плані та профілі, укладання та закріплення плит і балок універсального переїзного настилу, встановлення комплектуючих виробів.

Настил сучасного залізничного переїзду як правило складається з трьох рядів залізобетонних плит. Для двокільної ділянки кожен ряд

має шість плит, які укладаються до і після рейки і мають обпирання з жорстким кріпленням до залізобетонної шпали спеціальної конструкції. По довжині колії кожна плита прикріплена до п'яти шпал.

В цій роботі розглядаються питання будівництва переїздів на ділянках як нової траси європейської колії 1 435 мм, так і реконструкції окремих напрямків під євростандарт з застосуванням суміщеної колії (1 520/1 435 мм).

Стандарт підприємства Укрзалізниця СТП 02.01–002:2023 та креслення є цінним джерелом інформації, оскільки він показує, як Укрзалізниця вирішує питання суміщеної колії на практиці. Чинний стандарт СТП 02.01–002:2023 містить перевірені та затверджені технічні рішення, які відповідають вимогам безпеки, експлуатації та обслуговування на українській залізничній мережі [3]. Цей стандарт враховує особливості української колії 1 520 мм та її суміщення з 1 435 мм, а також місцеві умови експлуатації. Такий підхід включає адаптацію до українських типів шпал, скріплень, навантажень та кліматичних умов [1].

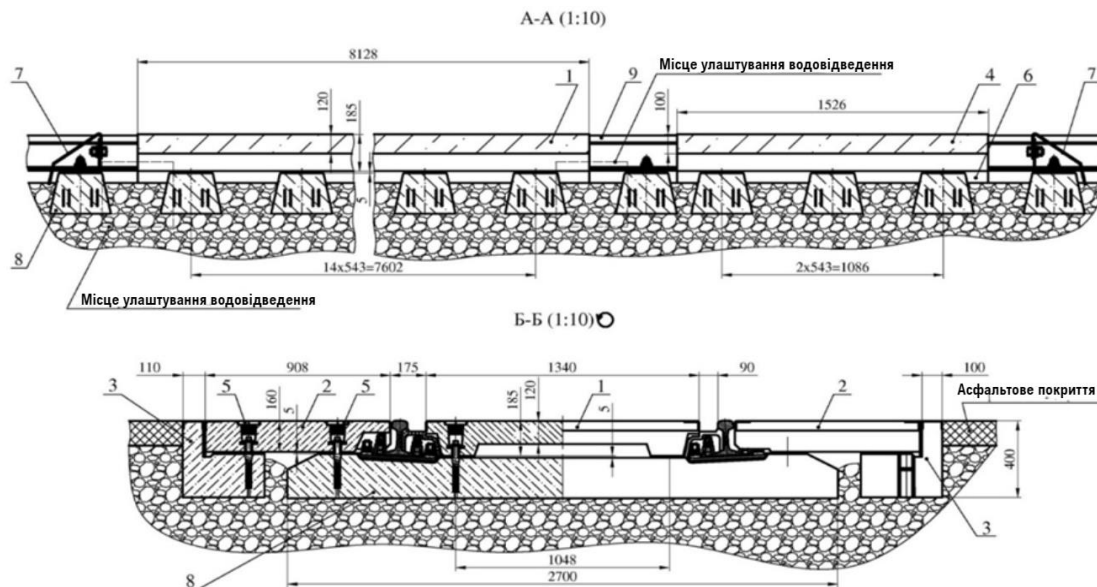


Рис. 5. Схеми поперечних перерізів універсального переїзного настилу на однокільній ділянці з рейками типу UIC60:

1 – плита внутрішня ПВу; 2 – плита зовнішня ПЗу; 3 – балка фундаментна БФу; 4 – плита внутрішня пішохідного настилу ПпВу; 5 – заглушка типу ЗШ; 6 – балка фундаментна БФпу; 7 – відбійник типу ВП; 8 – шпала мостова під плити переїзду; 9 – рейка типу UIC60

Fig. 5. Cross-sectional schemes of a universal level crossing deck on a single-track section with UIC60 rails:

1 – inner slab (PVu); 2 – outer slab (PZu); 3 – foundation beam (BFu); 4 – inner pedestrian slab (PpVu); 5 – plug type (ZSh); 6 – foundation beam (BFpu); 7 – bumper type (VP); 8 – bridge sleeper under crossing slabs; 9 – UIC60 rail

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

На кресленні (рис. 6) наведені конкретні розміри та конструктивні елементи (залізобетонні плити, металеві листи, дерев'яні

бруси, адаптація кріплень), що є надзвичайно важливим для практичного проектування.

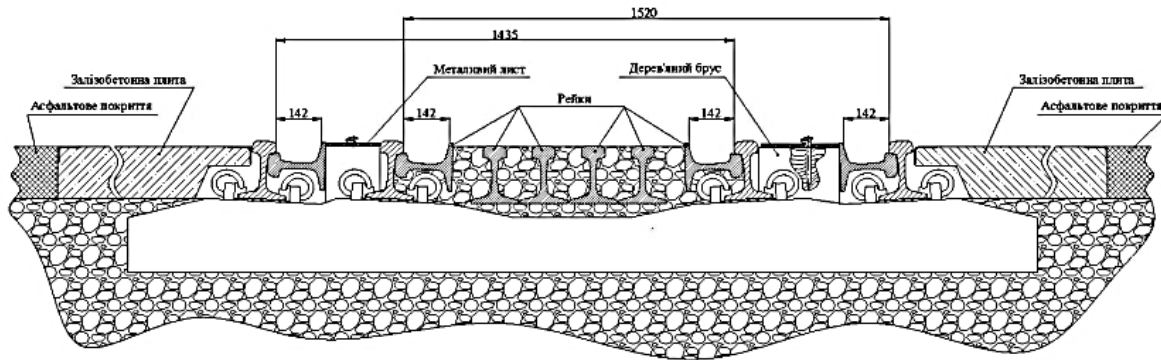


Рис. 6. Приклад облаштування залізничного переїзду на суміщеній колії

Fig. 6. Example of railway level crossing arrangement on a dual-gauge track

Виникає питання: чи існують кращі варіанти? «Кращі» варіанти – це відносне поняття, яке залежить від конкретних критеріїв оптимізації (вартість, довговічність, швидкість монтажу, рівень шуму, обслуговування тощо). На рис. 5 показані залізобетонні плити, але, як було показано раніше, існують також гумово-кордні модульні настили, застосування яких забезпечує:

- швидший монтаж завдяки меншій вазі та спрощеному кріпленню;
- менший шум та вібрацію із-за кращої амортизаційної властивості гуми;
- кращий комфорт для автомобілів – більш еластична поверхня.

До недоліків слід віднести вищу початкову вартість матеріалу та потенційно менший термін служби (хоча це компенсується легкістю заміни секцій).

Приклад Укрзалізниці в СТП 02.01–002:2023 є надійною та прийнятною основою для проектування переїздів на суміщеній колії в Україні. Він відображає поточні стандарти та підходи. «Кращі» варіанти будуть стосуватися, скоріше, оптимізації та вибору конкретних матеріалів та технологій, а не принципової схеми чотирьох рейок. Застосування гумово-кордних плит може бути «кращим» у певних умовах, наприклад, у міській забудові, де важливий рівень шуму, або на ділянках з дуже інтенсивним

автомобільним рухом, де швидкість монтажу є критичною.

Вибір між залізобетонними та гумово-кордними настилами, а також між різними типами скріплень, має бути зроблений на основі детального техніко-економічного аналізу конкретного проекту, враховуючи інтенсивність руху, бюджет, доступність матеріалів та вимоги до подальшого обслуговування.

Наукова новизна та практичне значення

У роботі вперше в українській практиці проведено системний аналіз ефективності сучасних типів переїзних настилів для суміщеної колії з використанням методу аналізу ієрархій (МАІ) для багатокритеріального вибору оптимального рішення. Застосування МАІ дало змогу визначити пріоритетність конструкцій переїзних настилів за такими критеріями, як довговічність, вартість, стійкість до вібрацій, шумопоглинання та складність обслуговування.

Отримані результати дозволяють сформуванню науково обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження сучасних технологій будівництва переїздів на ділянках залізниць із суміщеною колією. Розроблені положення можуть бути використані:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

– технічними та проектними підрозділами АТ «Укрзалізниця» при реалізації інфраструктурних проектів;

– виробниками елементів верхньої будови колії для адаптації конструкцій до вимог суміщеної колії;

– проектними організаціями для обґрунтування вибору технологічних рішень при новому будівництві та реконструкції переїздів.

Висновки

Ключовим стратегічним завданням розвитку залізничної галузі України є гармонізація з європейською залізничною мережею, яка функціонує на стандартній ширині колії 1 435 мм, тоді як українська мережа історично побудована на ширині 1 520 мм. Впровадження суміщеної колії є одним із найраціональніших та економічно доцільних шляхів вирішення цього завдання, оскільки забезпечує безперервний рух рухомого складу обох стандартів без необхідності перевантаження вантажів або заміни візків на прикордонних переходах.

Разом із тим, реалізація проектів суміщеної колії на існуючій інфраструктурі супроводжується низкою технологічних викликів, серед яких особливу складність становить будівництво

та експлуатація залізничних переїздів. Переїзди є критично важливими елементами інфраструктури, що забезпечують перетин залізниці з автомобільними дорогами, а на ділянках суміщеної колії вони перетворюються на потенційні «вузькі місця» всього проекту.

Суміщена колія на переїздах – технічно складне, проте вирішуване завдання. Найперспективнішими напрямками розвитку є застосування еластомерних настилів, роздільних покриттів та інтегрованих автоматизованих систем сигналізації. У перспективі, з огляду на розвиток високошвидкісного руху, доцільним є поступове усунення переїздів шляхом заміни їх на різнорівневі перетини.

У роботі вперше в українських умовах проведено системний аналіз ефективності сучасних типів переїзних настилів для суміщеної колії із застосуванням методу аналізу ієрархій (МАІ) для багатокритеріального вибору. Застосування цього методу дало змогу визначити пріоритетність конструкцій настилів за критеріями довговічності, вартості, стійкості до вібрацій, шумопоглинання та складності ремонту, а також розробити рекомендації щодо впровадження сучасних технологій будівництва переїздів на мережі залізниць України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.3-20:2025. Залізничні колії 1435 мм. Норми проєктування. [Чинний від 2026-01-01]. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку громад та територій України, 2025. 134 с.
2. Курган М. Б., Курган Д. М., Лужицький О. Ф., Гусак М. А., Байдак С. Ю. (2023). Оцінка варіантів дорожнього покриття на основі методу аналізу ієрархій. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 24. С. 37–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291856>
3. СТД 02.01-002:2023. Залізничні колії. Улаштування й утримання колії шириною 1435 мм та суміщеної залізничної колії (1520 і 1435 мм). Київ : АТ «Українська залізниця», 2023. 50 с.
4. Fischer S., Kurhan M., Kurhan D. (2024). Innovative Technologies and Cognitive Factors for Enhancing Safety of Train and Car Movement at Level Crossings. *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference (COGMOB 2024)*. 2024. P. 1–13. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_1
5. Hejczyk T. Smart system integrating modules with particular significance for rail crossings safety. *Archives of Transport System Telematics. Academia.edu*. 2024. URL: https://www.academia.edu/120267471/Smart_system_integrating_modules_with_particular_significance_for_rail_crossings_safety.
6. *Highway-Rail Crossing Handbook* : Handbook. 3rd ed. Washington : Federal Highway Administration (FHWA), 2022. 270 p. URL: <https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/2022-06/fhwas18040v2.pdf>.
7. Kurhan M., Kurhan D., Baidak S., Khmelevskyi V. The analytic hierarchy process as a cognitive tool for evaluating switch components. *Cognitive Sustainability*. 2025. Vol. 4, № 3. DOI: <https://doi.org/10.55343/cogsust.20523>
8. *Raport: Polsko-ukraińskie relacje kolejowe*. ver. 2.1. 2022. 182 p. URL: <https://rbf.net.pl/wp-content/uploads/2022/11/Raport-polsko-ukraińskie-relacje-kolejowe-ver-2.1.pdf>

9. TEKNICROSS® rubber level crossing elements. *Teknikum*. URL: <https://teknikum.com/products-brands/teknikum-teknicross-rubber-level-crossings-for-railways/>
10. Track Covers Level Crossings. *Railbeton haas*. URL: https://www.railbeton.de/login/file/?f=csdata/download/1/de/gleiseindeckung_eng0608_280
11. Zasiadko M. Ukraine plans dual gauge railway to EU. *Railtech.com*. 2019. URL: <https://www.railtech.com/infrastructure/2019/11/28/ukraine-plans-dual-gauge-railway-to-eu/>

M. B. KURHAN^{1*}, R. V. IVANOV²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

Features of Level Crossing Construction with the Use of Dual Gauge (1520/1435 mm) on the Ukrainian Railway Network

Purpose. The purpose of the study is to justify and develop technical solutions for the construction of railway level crossings on dual gauge tracks (1520/1435 mm), taking into account modern technologies and operational requirements within the Ukrainian railway network. The lack of unified and optimized solutions hinders the pace of dual gauge implementation on key network segments. To address this issue, an analysis was conducted of existing international and domestic regulatory documents related to the construction of level crossings on dual gauge tracks. Various technological solutions and materials for level crossing decks (rubber-cord, reinforced concrete, and combined types) were examined and compared, with an assessment of their operational and economic characteristics. **Methodology.** To select the most rational design option for level crossing decks, the study employed methods of systems analysis as well as the Analytic Hierarchy Process (AHP) to substantiate technical decisions. The methodology involves examining the specific features of constructing crossings on dual gauge track, selecting optimal materials and technologies capable of ensuring safety, reliability, and cost-effectiveness for the successful integration of the Ukrainian railway into the European rail system. **Findings.** A hierarchy of criteria was developed, followed by pairwise comparisons, calculation of weight coefficients, and a comprehensive evaluation of alternatives. The application of AHP made it possible to determine the priority of different crossing deck types based on criteria such as durability, cost, vibration resistance, noise absorption, and maintenance complexity. Recommendations were provided for the implementation of modern level crossing construction technologies on the Ukrainian railway network. **Originality.** For the first time in the context of Ukraine, a systematic analysis and efficiency assessment of modern level crossing deck types for dual gauge was conducted. This includes the application of the AHP method for multi-criteria decision-making. **Practical value.** The results of this research can be used by the technical and design departments of Ukrzaliznytsia in developing and implementing projects on sections with dual gauge tracks, by track component manufacturers to adapt their products to modern requirements, and by design organizations in substantiating the selection of technological solutions.

Keywords: dual-gauge track; railway level crossing; crossing deck; Analytic Hierarchy Process (AHP); Ukrzaliznytsia; construction; operational reliability

REFERENCES

1. Zaliznytsi kolii 1435 mm. Normy proiektuvannia, 134 DBN V.2.3-20:2025. (2025). (in Ukrainian)
2. Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., Luzhytskyi, O. F., Husak, M. A., & Baidak, S. Yu. (2023). Evaluation of pavement options based on the Analytic Hierarchy Process. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, (24), 37-49. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291856> (in Ukrainian)
3. Zaliznychni kolii. Ulashtuvannia y utrymannia kolii shyrynoi 1435 mm ta sumishchenoi zaliznychnoi kolii (1520 i 1435 mm), 50 STP 02.01-002:2023. (2023). (in Ukrainian)
4. Fischer, S., Kurhan, M., & Kurhan, D. (2024). Innovative Technologies and Cognitive Factors for Enhancing Safety of Train and Car Movement at Level Crossings. *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference (COGMOB 2024)*, 1-13. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_1 (in English)
5. Hejczyk, T. (2024). Smart system integrating modules with particular significance for rail crossings safety. *Archives of Transport System Telematics. Academia.edu*. Retrieved from:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- https://www.academia.edu/120267471/Smart_system_integrating_modules_with_particular_significance_for_rail_crossings_safety (in English)
6. *Highway-Rail Crossing Handbook* : Handbook. 3rd ed. (2022). Washington : Federal Highway Administration (FHWA), 270. Retrieved from: <https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/2022-06/fhwasal8040v2.pdf> (in English)
 7. Kurhan, M., Kurhan, D., Baidak, S., & Khmelevskiy, V. (2025). The analytic hierarchy process as a cognitive tool for evaluating switch components. *Cognitive Sustainability*, 4(3). DOI: <https://doi.org/10.55343/cogsust.20523> (in English)
 8. Raport: Polsko-ukraińskie relacje kolejowe, ver. 2.1. (2022). Retrieved from: <https://rbf.net.pl/wp-content/uploads/2022/11/Raport-polsko-ukrainskie-relacje-kolejowe-ver-2.1.pdf> (in Polish)
 9. TEKNICROSS® rubber level crossing elements. *Teknikum*. Retrieved from: <https://technikum.com/products-brands/technikum-teknicross-rubber-level-crossings-for-railways/> (in English)
 10. Track Covers Level Crossings. *Railbeton haas*. Retrieved from: https://www.railbeton.de/login/file/?f=csdata/download/1/de/gleiseindeckung_eng0608_280 (in English)
 11. Zasiadko, M. (2019). Ukraine plans dual gauge railway to EU. *Railtech.com*. URL: <https://www.railtech.com/infrastructure/2019/11/28/ukraine-plans-dual-gauge-railway-to-eu/> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.08.2025

Прийнята до друку: 19.12.2025

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.942:519.237

А. А. ЖАДАН^{1*}, В. І. ШИНКАРЕНКО²

¹Каф. «Комп'ютерні науки», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 620 28 06, ел. пошта gadan998@gmail.com, ORCID 0009-0003-1133-1630

²Каф. «Комп'ютерні науки», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 489 49 15, ел. пошта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

Сучасні методи та засоби роботи з часовими рядами

Мета. Провести структурований аналіз та класифікацію сучасних методів і моделей, що застосовуються для роботи з часовими рядами різної природи. При цьому була приділена увага не тільки типовими ознаками та родом обчислень, а й виділенням предметної області застосування, співставлення та виділення слабких та сильних сторін при роботі з різними наборами даних з приведенням відповідних прикладів областей використання з акцентом на переваги. **Методологія.** Поетапний та детальний розгляд наявних методів і моделей на основі їх основних характеристик, сфер використання та особливостей роботи із включення підходів різної природи та які використовують різні властивості часових рядів. **Результати.** Аналіз найбільш поширених методів обробки часових рядів та окремих розгляд їх представників. Особливу увагу приділено гібридним моделям, які можуть поєднувати методи одного або різних класів, а також нетиповим підходам, що ґрунтуються на специфічних властивостях часових рядів, зокрема їх фрактальності. **Наукова новизна.** Полягає у комплексному та фундаментальному розгляді методів аналізу часових рядів, починаючи від класичних лінійних і нелінійних статистичних моделей та методів штучного інтелекту, і закінчуючи гібридними й фрактальними підходами, з акцентом на виділення їхніх областей застосування та порівняння переваг і недоліків. **Практична значимість** дослідження полягає у систематизації матеріалу, який може бути використаний для попереднього аналізу предметної області та вибору інструментів з урахуванням їх ефективності, що, у свою чергу, спрощує пошук аналогів і скорочує час підготовки до досліджень. Окрім того, у роботі висвітлено менш відомі та нетипові методи, які становлять інтерес для подальших досліджень та можуть бути перспективними кандидатами для майбутніх наукових розробок у сфері роботи з часовими рядами.

Ключові слова: інформаційні технології; програмне забезпечення; часові ряди; RNN; мережі трансформери; конструктивно-продукційне моделювання; фрактали; рекурентні діаграми

Вступ

Часовий ряд є одним із найпоширеніших способів представлення зміни стану складної системи протягом визначеного проміжку часу та використовується для системного опису процесів на основі проведених спостережень. Таке представлення дозволяє здійснювати аналіз поточних процесів системи, будувати їхню характеристику та на основі наявних значень прогнозувати подальшу поведінку системи. Завдяки цьому часові ряди широко застосовують-

ся у фінансових, економічних, технічних, природничих та медичних дослідженнях.

З розвитком математичних методів та інформаційних технологій з'являється все більше інструментів для роботи з часовими рядами, включно з їх аналізом, моделюванням та прогнозуванням [41]. Кожна група методів має свої принципи роботи та специфіку застосування.

Класичні методи роботи з часовими рядами умовно поділяють на дві основні групи – лінійні та нелінійні моделі [23].

Лінійні методи базуються на припущенні, що залежності між поточними та попередніми

значеннями ряду можуть бути представлені як лінійні комбінації [38]. Такий підхід дозволяє будувати прості моделі, які легко реалізуються і використовуються на практиці. Однак точність прогнозування при наявності складних, нелінійних або фрактальних залежностей у наданому наборі даних залишається обмеженою.

Нелінійні методи дозволяють враховувати складні взаємозв'язки та внутрішню структуру ряду, включно з ефектами пам'яті, взаємозалежностями на різних часових масштабах та фрактальними властивостями, що забезпечує більш точне відтворення динаміки реальних процесів [15]. Проте такі методи потребують більших обчислювальних ресурсів і є складнішими у налаштуванні та інтерпретації.

Окрім класичних методів, у сучасних дослідженнях дедалі більше уваги приділяється нетиповим підходам, які не обмежуються стандартними статистичними або машинними методами.

Одним із таких підходів є конструктивно-продукційне моделювання [1], яке ґрунтується на використанні генеративної моделі часового ряду, яка дозволяє побудувати часові ряди різної структури [32]. Іншим прикладом нетипового підходу є рекурентний аналіз [5], що дозволяє виявляти приховані закономірності у нелінійних та хаотичних системах через реконструкцію фазового простору та аналіз повторюваних станів. Рекурентний аналіз не завжди передбачає пряме прогнозування, проте забезпечує детальне розуміння структури ряду та дозволяє будувати більш точні моделі прогнозування або виявляти критичні зміни у динаміці системи.

Мета

Метою даної роботи є здійснення ґрунтовної класифікації існуючих методів та моделей роботи з часовими рядами. У межах дослідження розглядаються як загальновідомі, так і більш нішові підходи, що відзначаються специфічними особливостями застосування. Особливу увагу приділено опису основних принципів функціонування кожного методу та аналізу сфер їх практичного використання, що дозволяє визначити їх ефективність залежно від типу та властивостей часових рядів.

Методика

Основний процес дослідження полягав у визначенні основних груп моделей, їх класифікаційних ознак, сфер використання, а також сильних і слабких сторін. Особливу увагу було приділено аналізу ключових характеристик часових рядів, які використовуються кожною з розглянутих моделей у процесі обробки та прогнозування. Крім загальновідомих представників класичних груп, до розгляду були включені також моделі, у основі яких лежать нетипові властивості часових рядів, що дозволяють підвищити ефективність аналізу складних та нестационарних даних. У якості відправної точки були обрані загальновідомі лінійні та нелінійні моделі.

Класичні лінійні методи. Як вже було зазначено, лінійні методи, які базуються на припущенні, що значення ряду можна описати як лінійну комбінацію попередніх спостережень. Базовими підходами, які можуть як використовуватися окремо, так й бути складовими більш комплексних моделей, є методи авторегресії та ковзного середнього [10, 12].

Модель авторегресії (AR) описує поточне значення ряду як лінійну комбінацію попередніх значень, що дозволяє ефективно відображати короткострокові залежності та тренди. Модель ковзного середнього (MA) фокусується на впливі випадкових коливань ряду, формуючи прогноз через лінійну комбінацію попередніх помилок та зменшуючи вплив шуму.

Ще одним відомим лінійним підходом є експоненційне згладжування, яке застосовується для прогнозування рядів із тенденціями та сезонними коливаннями. Принцип цього методу полягає у наданні більшої ваги останнім спостереженням, що дозволяє моделі швидко реагувати на зміни динаміки ряду. Існують різні варіанти експоненційного згладжування: просте, подвійне та потрійне, що дозволяє враховувати тренд і сезонність.

Завдяки гнучкості та простоті експоненційне згладжування широко використовується у практичних задачах прогнозування, особливо коли необхідно отримати швидкий прогноз без складної налаштування.

Для більш наочного розгляду застосування основних компонентів лінійних методів прогнозування можна виділити моделі ARIMA (ав-

торегресійна інтегрована модель ковзного середнього) [16] та SARIMA [24], які, у свою чергу, є узагальненням моделі ARMA [7] (авторегресійна ковзна середня). Обидві моделі включають наступні ключові компоненти: авторегресію (AutoRegressive), що описує залежність поточного значення ряду від попередніх; інтегрування (Integrated), яке забезпечує перетворення ряду до стаціонарного стану; та ковзне середнє (Moving Average), що враховує вплив випадкових коливань помилок прогнозування.

Головна відмінність SARIMA полягає у врахуванні сезонності значень часового ряду, що дозволяє моделі відстежувати повторювані циклічні залежності та інтервальні коливання.

Модель ARIMA демонструє високу ефективність при роботі з часовими рядами без чітко вираженої сезонності або коли аналіз охоплює короткі проміжки часу [8, 17]. У випадках, коли вхідні дані мають явну сезонну природу, застосовують SARIMA, що дозволяє більш точно відображати циклічні коливання та сезонні закономірності [9, 25].

Нелінійні методи прогнозування. Нелінійні методи базуються не лише на лінійних зв'язках між значеннями часового ряду, але й враховують складніші та нетривіальні залежності, що дозволяє описувати ряди з більш динамічною структурою.

До класичних представників цього класу належать моделі ARCH та GARCH [21], які ґрунтуються на припущенні, що дисперсія часового ряду на кожному часовому проміжку не є сталою величиною, а визначається набором параметрів. Ключова відмінність полягає у тому, що модель GARCH враховує не лише залежність від попередніх помилок прогнозу, а й вплив попередніх значень дисперсії на поточний стан. Завдяки цій властивості, моделі ARCH та GARCH широко використовуються у задачах аналізу і прогнозування часових рядів із високим рівнем волатильності, зокрема у фінансовій сфері, де їх ефективність часто порівнюється з результатами ARIMA-моделей [35].

Окрім врахування змінної дисперсії, окремим важливим напрямом нелінійних підходів є використання фрактальних властивостей часових рядів. Виділяють три ключові характеристики фрактальності:

– самоподібність – здатність часового ряду проявляти повторюваний патерн, який зберігає свою форму при розгляді на різних масштабах;

– фрактальна розмірність – на відміну від класичної евклідової розмірності, може приймати дробові значення, що характеризують складність структури та ступінь заповнення простору[2];

– довготривала залежність (Long-Range Dependence, LRD) – збереження впливу попередніх значень на поточні навіть на великих часових інтервалах.

Найбільш значущим показником фрактальності виступає показник Херста [28], який використовується для оцінки як фрактальної розмірності, так і ступеня LRD. Його значення змінюються у межах (0, 1): наближені до 0,5 свідчать про слабку фрактальність; значення, близькі до 1 – про високу персистентність і сильну довготривалу пам'ять; значення, близькі до 0,1 – про антиперсистентну поведінку. Показник Херста є основою для мультифрактальних моделей (MMAR, MFDFA) [19] та використовується у модифікаціях існуючих методів, зокрема у моделі дробового броунівського руху (fBm)[1] та ARFIMA [20].

Область застосування фрактальних моделей є надзвичайно широкою. Вони ефективні при роботі з рядами, що мають складну структуру, високий рівень самоподібності та виражені ознаки довготривалої пам'яті. Найчастіше їх застосовують для аналізу фінансових часових рядів [11], кліматичних та метеорологічних даних [18], біомедичних сигналів [3], показників енергетичних і телекомунікаційних систем [6, 10], а також у геофізичних і сейсмологічних дослідженнях.

Перевагою нелінійних методів є їхня універсальність і здатність відображати складні залежності, недосяжні для лінійних моделей. Водночас недоліком є підвищена обчислювальна складність і необхідність ретельного налаштування.

Методи штучного інтелекту. З розвитком інформаційних технологій, штучного інтелекту та синтетичних нейронних мереж, для вирішення задач прогнозування часових рядів дедалі частіше застосовують саме ці підходи. Основними перевагами моделей штучного інтелекту порівняно з класичними лінійними та нелі-

нійними статистичними методами є висока гнучкість та адаптивність до складних структур і взаємозв'язків у даних, можливість автоматизації процесу навчання, а також, як правило, вища точність прогнозів порівняно зі звичайними моделями.

Найбільшим недоліком таких моделей є необхідність фази навчання, яка потребує попередньої підготовки та перетворення вхідних даних для прискорення обчислень. Після цього починається процес навчання на основі наявних фрагментів часового ряду. Здебільшого він полягає у поетапній подачі фіксованих вікон даних разом з очікуваним результатом.

Під час навчання мережа встановлює та коригує внутрішні зв'язки між елементами, формуючи необхідні приховані параметри. Процес повторюється декілька разів (епох) для остаточного налаштування моделі. Важливо підтримувати баланс між кількістю поданих фрагментів для навчання та кількістю епох, щоб уникнути як недонавчання, так і перенавчання мережі.

Найпоширенішою архітектурою нейронних мереж для прогнозування подальших значень часових рядів є рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN) [26]. Основна ідея RNN полягає у наявності внутрішньої пам'яті, яка поступово збагачується на основі кожного циклу навчання. Завдяки цьому інформація з попередніх кроків передається у наступні, що дозволяє моделі зберігати залежності між значеннями часового ряду на різних часових масштабах. Така властивість робить RNN особливо ефективними для роботи з послідовними даними, де порядок та взаємозв'язки між спостереженнями мають критичне значення.

Попри свої переваги, класичні RNN часто стикаються з проблемами затухання градієнта або вибуху градієнта при роботі з довгими послідовностями.

RNN та їхні варіації широко застосовуються не лише для прогнозування фінансових та економічних часових рядів [36], але й у задачах обробки природної мови [27], біомедичних сигналів [31], енергетичних систем [4] та метеорологічних даних [22]. Вони дозволяють моделювати складні нелінійні залежності, що важко піддаються аналізу класичними лінійними або простими нелінійними методами.

Модель LSTM. З усіх варіантів рекурентних нейронних мереж найбільш поширеним є LSTM (Long Short-Term Memory). Основною його особливістю є наявність каналу довготривалої пам'яті, який поетапно накопичує інформацію, та трьох типів вентилів, що регулюють потік даних у канал і з нього. Кожен вентиль виконує конкретні функції:

- вхідний вентиль визначає, які нові фрагменти інформації слід додати до поточного стану каналу, забезпечуючи збереження важливих деталей з поточного кроку;

- вентиль забуття вирішує, які елементи інформації потрібно видалити на основі порівняння попереднього стану та поточного вхідного сигналу, що дозволяє контролювати накопичення надлишкових даних;

- вихідний вентиль контролює, які фрагменти з поточного стану каналу будуть передані на вихід, враховуючи як попередній стан, так і поточний вхід, забезпечуючи коректну передачу інформації далі.

Область застосування LSTM включає часові ряди з довготривалими залежностями та складними закономірностями між значеннями. Типовими прикладами є зміни вартості акцій [34].

До основних недоліків LSTM відносять схильність до перевантажень, високі обчислювальні витрати, а також значну чутливість до налаштувань гіперпараметрів, що вимагає ретельного підбору параметрів навчання [43].

Нейронні мережі трансформери. У 2020-х роках великої популярності набули моделі Трансформери, які стали домінуючим архітектурним стилем для сучасних моделей [39].

Основна відмінність трансформерів від класичних RNN-підходів полягає у впровадженні механізму самоуваги (self-attention). Принцип його роботи полягає у одночасному сприйнятті всього набору вхідних даних без необхідності їх послідовної обробки. Для кожного елемента обчислюється оцінка його впливу на всі інші елементи.

Архітектура трансформерів зробила справжню революцію у сфері обробки природної мови (NLP) та генеративних моделей [37]. Разом із цим, на її основі були розроблені підходи для роботи з часовими рядами. Одним із таких рішень є Autoformer [42], принцип роботи якого

базується на декомпозиції часового ряду та обчисленні автокореляції.

Під час першого етапу вхідний часовий ряд розкладається на компоненти, які відображають тренд та сезонність, з використанням ковзного середнього. Далі обчислюється показник автокореляції між отриманими компонентами, що дозволяє моделі виявляти можливі затримки у часі, які корелюють із поточними значеннями. Отримані закономірності використовуються для прогнозування подальших значень ряду.

Гібридні моделі нейронних мереж. Як і класичні статистичні моделі, сучасні моделі машинного навчання також розширюються через гібридизацію архітектури та додавання нових елементів для підвищення ефективності.

Беручи за приклад моделі типу LSTM, можна виділити два основних підходи: розширення за допомогою додаткових статистичних операцій та повне гібридне поєднання з іншими моделями машинного навчання.

До першого підходу відносять, наприклад, моделі LSTM–ARIMA [13]. Як випливає з назви, вона поєднує роботу двох моделей: ARIMA відповідає за побудову прогнозу лінійної частини часового ряду, а різниця між реальними даними та прогнозом передається у LSTM для моделювання нелінійних компонентів.

Другий підхід передбачає повне гібридне поєднання LSTM з іншими сучасними ML-моделями, як-от Autoformer–LSTM [40] та CNN–LSTM [44].

У моделі Autoformer–LSTM перший етап передбачає декомпозицію часового ряду та обчислення автокореляції для визначення довгострокових залежностей. На основі цих даних Autoformer формує довгостроковий прогноз, а LSTM у другому етапі аналізує короткострокові залежності та фіналізує прогноз, забезпечуючи точне відтворення як глобальних, так і локальних патернів.

У моделі CNN–LSTM спочатку використовується CNN-шар, який виділяє локальні ознаки та зменшує шум у вхідних даних. Після цього LSTM-шар аналізує часові залежності між виділеними ознаками, що дозволяє моделі захоплювати як просторові, так і тимчасові закономірності в ряді.

FractalNet–LSTM модель. Окремо слід виділити підхід до гібридизації моделей на основі використання специфічних властивостей часових рядів. Одним із прикладів є модель FractalNet–LSTM, яка поєднує фрактальну нейронну мережу та рекурентну нейронну мережу LSTM [30].

Процес обробки даних у цій моделі виглядає наступним чином:

– фрактальні шари – вхідні дані проходять через кілька шарів фрактальної згортки, на яких виділяються складні патерни та ознаки самоподібності значень ряду. Цей етап дозволяє вилучити ключові характеристики структури часового ряду, які важко врахувати традиційними методами;

– LSTM-шар – отримані ознаки передаються до LSTM, яка аналізує їх у часовому контексті та моделює залежності між послідовними значеннями для прогнозування подальших станів ряду.

Проте, у випадку рядів з високою волатильністю, наприклад, фінансових показників, результати показали, що модель потребує додаткового доопрацювання [30]. Це свідчить про те, що комбінація фрактальної та рекурентної обробки дає переваги при складних структурних залежностях.

Рекурентний аналіз та використання рекурентних діаграм. Рекурентний аналіз є методом дослідження динаміки часових рядів, який ґрунтується на ідеї повторюваності станів системи. Основна мета підходу полягає у визначенні моментів часу, коли система повертається до стану, близького до попереднього. Це дозволяє виявляти закономірності, періодичність, хаотичні поведінки та структурні зміни ряду.

Для візуального аналізу таких повторів використовуються рекурентні діаграми (Recurrence Plots, RP). Вони дозволяють наочно відобразити моменти, коли значення ряду знову наближаються до попередніх станів. Чорні точки на діаграмі позначають наявність повторюваного стану, а білі – його відсутність (рис. 1). Завдяки цьому можна легко виявляти періодичні або повторювані патерни, структурні зміни у динаміці ряду, а також наявність хаотичної поведінки чи аномалій.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

На основі рекурентних діаграм також розроблені кількісні показники, які дозволяють більш детально аналізувати часовий ряд [14]. До них відносять частку точок, що відображає загальну повторюваність, відсоток точок, які формують діагональні лінії, що свідчить про регулярність поведінки, а також вертикальні лінії, які вказують на застійні або «заблоковані» стани. Крім того, за допомогою спеціальних метрик визначається складність і непередбачуваність ряду [5, 29].

Рекурентний аналіз та діаграми особливо ефективні для дослідження складних, нелінійних та фрактальних часових рядів. До таких відносять фінансові індекси, кліматичні та метеорологічні дані, біомедичні сигнали, енергетичні та геофізичні ряди. Використання цього підходу дозволяє оцінити структуру ряду, виділити закономірності, виявити довгострокові залежності та підготувати дані для подальшого моделювання або прогнозування.

Таким чином, рекурентний аналіз разом із рекурентними діаграмами є потужним інструментом для вивчення динаміки часових рядів, особливо там, де класичні лінійні та прості статистичні методи виявляються недостатньо ефективними.

Конструктивно-продукційне моделювання фрактальних часових рядів. Окрім вже зазначених поширених методів роботи та прогнозування часових рядів слід також відзначити й метод на основі конструктивно-продукційного моделювання [1]. Основними сутностями даного підходу є конструктори, які презентують набір носіїв, сигнатури відносин та операцій, набір тверджень з інформацією для підтримки процесу конструювання [32].

Елементом роботи безпосередньо з фрактальними часовими рядами в даному випадку виступає конструктивна модель, яка описує структуру та окремі математичні параметри. Для опису структури і довгоіснуючих зв'язків використовується L-система [33].

Описані конструктивні моделі вирізняються великим рівнем гнучкості, який полягає у можливості генерації як детермінованих так і стохастичних (рис. 2) часових рядів відповідно до визначених математичних параметрів.

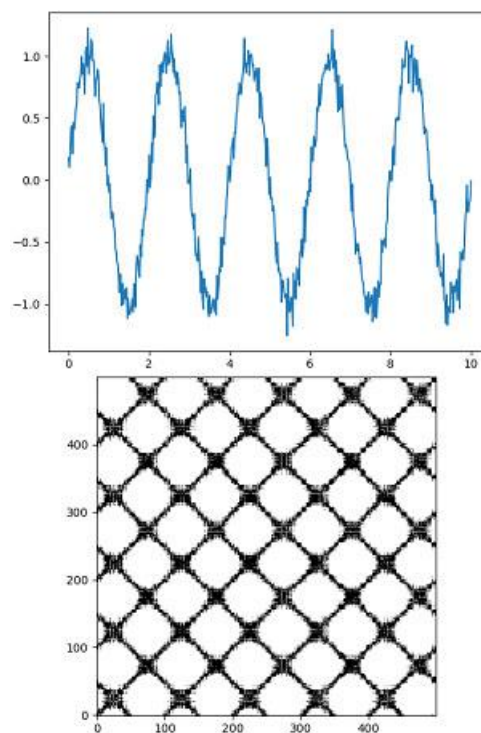


Рис. 1. Графік часового ряду та відповідна йому рекурентна діаграма

Fig. 1. Time series graph and corresponding recurrence diagram

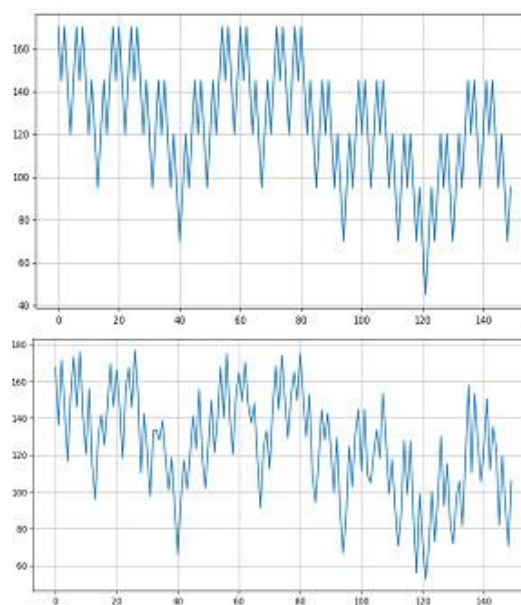


Рис.2. Часові ряди породжені однією конструктивною моделлю з та без впровадження показника дисперсії

Fig. 2. Time series generated by one constructive model with and without introducing dispersion measure

Результати

У цій роботі були розглянуті основні класи методів аналізу часових рядів, а також найпоширеніші їхні представники із зазначенням сфер використання, переваг та обмежень. Особливу увагу приділено менш відомим, але перспективним підходам, які враховують специфічні властивості часових рядів, такі як фрактальність та рекурентність.

Було проаналізовано кілька основних груп моделей – лінійні, нелінійні та гібридні. Поряд із цим розглянуто також методи рекурентного аналізу та конструктивно-продукційного моделювання, які представляють альтернативні, нетипові підходи до дослідження динамічних систем.

Кожен із описаних методів має власні сфери застосування та цілі. Більшість моделей орієнтовані безпосередньо на прогнозування часових рядів і демонструють високу ефективність у межах цього завдання. Водночас їхні можливості часто обмежуються лише отриманням прогнозу, без формування додаткових артефактів аналізу, які могли б бути використані в ширшому контексті.

Методи рекурентного аналізу, навпаки, роблять акцент не лише на результаті прогнозу, а й на проміжних артефактах, таких як рекурентні діаграми або конструктивні моделі. Ці елементи можуть слугувати джерелом глибшого розуміння внутрішньої структури ряду та застосовуватися для розв'язання ширшого кола завдань, включно з класифікацією, виявленням аномалій чи прогнозуванням.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що сьогодні існує широкий спектр інструментів для аналізу часових рядів різної природи та складності. Однак наразі неможливо виокремити універсальну модель, яка б домінувала за всіма критеріями ефективності. Саме тому активно розвиваються нові методи та гібридні архітектури, що поєднують переваги різних підходів і компенсують їхні обмеження. Це створює міцне підґрунтя для подальших досліджень і вдосконалення методик прогнозування часових рядів.

Наукова новизна та практична значимість

Подібна класифікація відомих методів роботи з часовими рядами дозволяє систематизувати наявний інструментарій і значно скоротити час, необхідний на початкових етапах дослідження або практичної роботи в обраній сфері. Такий підхід сприяє не лише кращому розумінню можливостей різних груп методів, але й дозволяє обирати найбільш доцільні засоби для вирішення конкретних завдань.

Крім того, подібна класифікація дає змогу розглядати методи не лише в контексті основного завдання прогнозування часових рядів, але й у ширшому аспекті – для аналізу, інтерпретації та моделювання.

Висновки

Широке застосування часових рядів для опису та аналізу складних систем зумовило появу значної кількості різноманітних методів роботи з ними. Основним завданням у цій сфері є прогнозування подальших значень, що має важливе значення як для виконання практичних дій у поточний момент (наприклад, у випадку фінансових інвестицій), так і для завчасної підготовки до можливих подій чи станів системи (зокрема, природних катастроф). Очевидно, що точність результатів та універсальність обраної моделі безпосередньо визначають її цінність та практичну ефективність.

З розвитком сучасних математичних підходів та інформаційних технологій сформувалося широке коло моделей для прогнозування часових рядів. Загалом їх можна умовно поділити на три основні класи: статистичні методи, моделі машинного навчання та інші, нетипові підходи.

Статистичні методи утворюють теоретичний фундамент, на основі якого побудовані класичні алгоритми прогнозування. Моделі машинного навчання, у свою чергу, ґрунтуються на автоматизації процесів і демонструють здатність працювати зі складнішими структурами та великими обсягами даних. Нетипові методи поєднують підходи з різних дисциплін, відкриваючи нові можливості для роботи з рядами особливої природи.

Основним викликом залишається різноманітність структур і типів зв'язків між значеннями часових рядів. Вони можуть мати лінійний або нелінійний характер, проявляти сезонність, фрактальні властивості чи високий рівень волатильності. У наслідок цього для деяких завдань більш доцільним є застосування простих ліній-

них моделей, тоді як для інших необхідне використання сучасних архітектур нейронних мереж. Таким чином, перш ніж розпочати роботу з часовим рядом, слід провести його класифікацію та обрати найбільш адекватну модель для прогнозування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скалозуб В., Ільман В., Білий Б. Конструктивні багаточарові моделі для впорядкування послідовностей з урахуванням складності операцій формування. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 4(88). С. 61–76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213232>
2. Al-Kadi O. S. Fractals for biomedical texture analysis. *Biomedical Texture Analysis*. 2017. P. 131–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812133-7.00005-3>
3. Bansal I. R., Ashourvan A., Bertolero M., Bassett D. S., Pequito S. Model-based stationarity filtering of long-term memory data applied to resting-state blood-oxygen-level-dependent signal. *PLOS ONE*. 2022. Vol. 17, Iss. 7. e0268752. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268752>
4. Bashar M. A., Nayak R., Astin-Walmsley K., Heath K. Machine learning for predicting propensity-to-pay energy bills. *Intelligent Systems with Applications*. 2023. Vol. 17. 200176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200176>
5. Belozyorov V., Zaytsev V. Recurrence analysis of time series generated by 3D autonomous quadratic dynamical system depending on parameters. *Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications*. 2016, Vol. 24, № 8. P. 56–70. DOI: <https://doi.org/10.15421/141604>
6. Castro A. L., Marcato A. L. M., De Aguiar E. P. Multifractal analysis of the Brazilian electricity market. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 98939–98957. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3313099>
7. Chen J.-F., Wang W.-M., Huang C.-M. Analysis of an adaptive time-series autoregressive moving-average (ARMA) model for short-term load forecasting. *Electric Power Systems Research*. 1995. Vol. 34, Iss. 3. P. 187–196. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00977-1](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00977-1)
8. Contreras J., Espinola R., Nogales F. J., Conejo A. J. ARIMA models to predict next-day electricity prices. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003. Vol. 18, Iss. 3. P. 1014–1020. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2002.804943>
9. Dabral P. P., Murry M. Z. Modelling and forecasting of rainfall time series using SARIMA. *Environmental Processes*. 2017. Vol. 4. P. 399–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0226-y>
10. Ghaffarpour R., Zamanian S. Fractal-based lightning model for investigation of lightning direct strokes to the communication towers. *Electrical Engineering*. 2022. Vol. 104. P. 2543–2551. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01503-w>
11. Gottimukkala S. R. Applying the Multifractal Model of Asset Returns (MMAR) to financial markets: insights and limitations. *10th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*. (Noida, India, 20–22 February 2025). Noida, 2025. P. 277–282. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsc64553.2025.10968868>
12. Kaur J., Parmar K. S., Singh S. Autoregressive models in environmental forecasting time series: a theoretical and application review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, Iss. 8. P. 19617–19641. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25148-9>
13. Kashif K., Ślepaczuk R. LSTM-ARIMA as a hybrid approach in algorithmic investment strategies. *Knowledge-Based Systems*. 2025. Vol. 320. 113563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113563>
14. Kirichenko L., Radivilova T., Stepanenko J. Applying recurrence plots to classify time series. *Computational Linguistics and Intelligent Systems*. Proceedings of the 5th International Conference, COLINS-2021. (Kharkiv, 22-23 April 2021) Kharkiv, 2021, P. 16–26. URL: https://web.kpi.kharkov.ua/iks/wp-content/uploads/sites/113/2021/10/CoLInS_Volume2_2021.pdf
15. Konar S., Auluck N., Ganesan R., Goyal A. K., Kaur T., Sahi M., Samra T., Thingnam S. K. S., Puri G. D. A non-linear time series based artificial intelligence model to predict outcome in cardiac surgery. *Health Technology*. 2022. Vol. 12, Iss. 6. P. 1169–1181. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12553-022-00706-2>
16. Kontopoulou V. I., Panagopoulos A. D., Kakkos I., Matsopoulos G. K. A review of ARIMA vs. machine learning approaches for time series forecasting in data driven networks. *Future Internet*. 2023. Vol. 15, Iss. 8. P. 255. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15080255>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

17. Lee C.-M., Ko C.-N. Short-term load forecasting using lifting scheme and ARIMA models. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38, Iss. 5. P. 5902–5911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.033>
18. Meenakshi M., Gowrisankar A. Multifractal analysis on ozone depletion and climate change: the time series approaches. *Contemporary Mathematics*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 594–616. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.6120256141>
19. Mensi W., Kumar A. S., Vo X. V., Kang S. H. Asymmetric multifractality and dynamic efficiency in DeFi markets. *Journal of Economic and Financial Studies*. 2024. Vol. 48, Iss. 2. P. 280–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12197-023-09655-6>
20. Monge M., Infante J. A fractional ARIMA (ARFIMA) model in the analysis of historical crude oil prices. *Energy RESEARCH LETTERS*. 2023. Vol. 4, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.46557/001c.36578>
21. Oktaviani F., Miftahuddin, Setiawan I. Forecasting sea surface temperature anomalies using the SARIMA ARCH/GARCH model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1882. 012020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012020>
22. Ouma Y. O., Cheruyot R., Wachera A. N. Rainfall and runoff time-series trend analysis using LSTM recurrent neural network and wavelet neural network with satellite-based meteorological data: case study of Nzoia hydrologic basin. *Complex & Intelligent Systems*. 2022. Vol. 8, Iss. 1. P. 213–236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00365-2>
23. Park M.-J., Yang H.-S. Comparative Study of Time Series Analysis Algorithms Suitable for Short-Term Forecasting in Implementing Demand Response Based on AMI. *Sensors*. 2024. Vol. 24, Iss. 22. P. 7205. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24227205>
24. Pramanik A., Sultana S., Rahman Md. S. Time series analysis and forecasting of Monkeypox disease using ARIMA and SARIMA model. *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. (Kharagpur, 03-05 October 2022). Kharagpur, 2022. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/icccnt54827.2022.9984345>
25. Ray S., Das S. S., Mishra P., Al Khatib A. M. G. Time series SARIMA modelling and forecasting of monthly rainfall and temperature in the South Asian countries. *Earth Systems and Environment*. 2021. Vol. 5, Iss. 3. P. 531–546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00205-w>
26. Salem F. M. Recurrent Neural Networks (RNN). *Recurrent Neural Networks*. Cham, 2022. P. 43–67. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89929-5_3
27. Saraswat M., Srishti. Leveraging genre classification with RNN for book recommendation. *International Journal of Information Technology*. 2022. Vol. 14, Iss. 7. P. 3751–3756. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41870-022-00937-6>
28. Serletis A., Rosenberg A. A. The Hurst exponent in energy futures prices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007. Vol. 380. P. 325–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.055>
29. Shabani M., Magris M., Tzagkarakis G., Kannianen J., Iosifidis A. Predicting the state of synchronization of financial time series using cross recurrence plots. *Neural Computing and Applications*. 2023. Vol. 35, Iss. 25. P. 18519–18531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08674-y>
30. Shakhovska N., Shymanskyi V., Prymachenko M. FractalNet-LSTM model for time series forecasting. *Computers, Materials & Continua*. 2025. Vol. 82, Iss. 3. P. 4469–4484. DOI: <https://doi.org/10.32604/cm.2025.062675>
31. Shen J., Liu F., Tu Y., Tang C. Finding gene network topologies for given biological function with recurrent neural network. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. 3125. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23420-5>
32. Shynkarenko K., Lytvynenko R., Chyhir I., Nikitina I. Modeling of lightning flashes in thunderstorm front by constructive production of fractal time series. *Advances in Intelligent Systems and Computing IV*. 2020. Vol. 1080. P. 173–185. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_13
33. Shynkarenko V., Zhadan A. Modeling of the deterministic fractal time series by one rule constructors. *Proceedings of the 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. (Zbarazh, 23-26 September 2020). Zbarazh, 2020. P. 336–339. DOI: <https://doi.org/10.1109/csit49958.2020.9321923>
34. Sohail A., Afroz H., Singh J. N., Goel D., Jasim L. H. Stock price prediction using LSTM. *2024 1st International Conference on Advances in Computing, Communication and Networking (ICAC2N)*. (Greater Noida, 16-17 December 2024). Greater Noida, 2024. P. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/icac2n63387.2024.10895015>

35. Srihari G., Kusuma T., Chetanraj D. B., Kumar J. P. S., Aluvala R. Predictive modeling of return volatility in sustainable investments: An in-depth analysis of ARIMA, GARCH, and ARCH techniques. *Investment Management and Financial Innovations*. 2024. Vol. 21, Iss. 1. P. 213–228.
DOI: [https://doi.org/10.21511/imfi.21\(1\).2024.17](https://doi.org/10.21511/imfi.21(1).2024.17)
36. Srivastava P., Mishra P. K. Stock market prediction using RNN LSTM. *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. (Bangalore, 01-03 October 2021). Bangalore, 2021. P. 1–5.
DOI: <https://doi.org/10.1109/gcat52182.2021.9587540>
37. Thirunavukarasu R., Kotei E. A comprehensive review on transformer network for natural and medical image analysis. *Computer Science Review*. 2024. Vol. 53. 100648.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100648>
38. Toner W., Darlow L. An Analysis of Linear Time Series Forecasting Models. *arXiv.org*. 2024.
DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.14587>
39. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. *arXiv.org*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
40. Wang H., Yao J. Forecasting carbon emissions in power systems using Autoformer and LSTM: a case study of the Spanish electricity market. *2025 8th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*. (Wuxi, 25-27 April 2025). Wuxi, 2025. P. 1445–1450.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ceepe64987.2025.11033988>
41. Weigend A. S. *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. New York : Routledge, 2018. 663 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429492648>
42. Wu H., Xu J., Wang J., Long M. Autoformer: decomposition transformers with auto-correlation for long-term series forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2021. Vol. 34, P. 22419–22430.
URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2021/file/bcc0d400288793e8bdcd7c19a8ac0c2b-Paper.pdf
43. Yilmaz D., Büyükahtakin İ. E. Learning optimal solutions via an LSTM-optimization framework. *Operations Research Forum*. 2023. Vol. 4, Iss. 2. Art. 48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-023-00224-5>
44. Zha W., Liu Y., Wan Y., Luo R., Li D., Yang S., Xu Y. Forecasting monthly gas field production based on the CNN-LSTM model. *Energy*. 2022. Vol. 260. 124889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124889>

A. A. ZHADAN^{1*}, V. I. SHYNKARENKO²

^{1*}Dep. «Computer Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 620 28 06, e-mail gadan998@gmail.com, ORCID 0009-0003-1133-1630

²Dep. «Computer Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 489 49 15, e-mail shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

Modern Methods and Tools for Working with Time Series

Purpose. To conduct a structured analysis and classification of modern methods and models used to work with time series of various nature. Attention was paid not only to typical features and types of calculations, but also to identifying the subject area of application, comparing and highlighting strengths and weaknesses when working with different data sets, with relevant examples of areas of use and an emphasis on advantages. **Methodology.** A step-by-step and detailed review of existing methods and models based on their main characteristics, areas of use, and features of working with approaches of different nature that use different properties of time series. **Findings.** Analysis of the most common methods for processing time series and a separate review of their representatives. Particular attention is paid to hybrid models that can combine methods of one or different classes, as well as atypical approaches based on the specific properties of time series, in particular their fractality. **Originality.** It consists in a comprehensive and fundamental consideration of methods for analyzing time series, ranging from classical linear and nonlinear statistical models and artificial intelligence methods to hybrid and fractal approaches, with an emphasis on identifying their areas of application and comparing their advantages and disadvantages. **The practical value** of the research lies in the systematization of material that can be used for preliminary analysis of the subject area and selection of tools based on their effectiveness, which, in turn, simplifies the search for analogues and reduces the time required to prepare for research. In addition, the work highlights lesser-known and atypical methods that are of interest for further research and may be promising candidates for future scientific developments in the field of time series analysis.

Keywords: information technology; software; time series; RNN; transformer networks; constrictive-synthesizing modeling; fractal; recurrent plots

REFERENCES

1. Skalozub, V., Ilman, V., & Bilyy, B. (2020). Constructive multiplayer models for ordering a set of sequences, taking into account the complexity operations of formations. *Science and Transport Progress*, 4(88), 61-76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213232> (in Ukrainian)
2. Al-Kadi, O. S. (2017). Fractals for biomedical texture analysis. *Biomedical Texture Analysis*, 131-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812133-7.00005-3> (in English)
3. Bansal, I. R., Ashourvan, A., Bertolero, M., Bassett, D. S., & Pequito, S. (2022). Model-based stationarity filtering of long-term memory data applied to resting-state blood-oxygen-level-dependent signal. *PLOS ONE*, 17(7), e0268752. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268752> (in English)
4. Bashar, M. A., Nayak, R., Astin-Walmsley, K., & Heath, K. (2023). Machine learning for predicting propensity-to-pay energy bills. *Intelligent Systems with Applications*, 17, 200176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200176> (in English)
5. Belozyorov, V., & Zaytsev, V. (2016) Recurrence analysis of time series generated by 3D autonomous quadratic dynamical system depending on parameters. *Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications*, 24(8), 56-70. DOI: <https://doi.org/10.15421/141604> (in English)
6. Castro, A. L., Marcato, A. L. M., & De Aguiar, E. P. (2023). Multifractal analysis of the Brazilian electricity market. *IEEE Access*, 11, 98939-98957. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3313099> (in English)
7. Chen, J.-F., Wang, W.-M., & Huang, C.-M. (1995). Analysis of an adaptive time-series autoregressive moving-average (ARMA) model for short-term load forecasting. *Electric Power Systems Research*, 1995, 34(3), 187-196. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00977-1](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00977-1) (in English)
8. Contreras, J., Espinola, R., Nogales, F. J., & Conejo, A. J. (2003). ARIMA models to predict next-day electricity prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(3), 1014-1020. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2002.804943> (in English)
9. Dabral, P. P., & Murry, M. Z. (2017). Modelling and forecasting of rainfall time series using SARIMA. *Environmental Processes*, 4, 399-419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0226-y> (in English)
10. Ghaffarpour, R., & Zamanian, S. (2022). Fractal-based lightning model for investigation of lightning direct strokes to the communication towers. *Electrical Engineering*, 104, 2543-2551. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01503-w> (in English)
11. Gottimukkala, S. R. (2025, February). Applying the Multifractal Model of Asset Returns (MMAR) to financial markets: insights and limitations. In *10th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)* (pp. 277-282). Noida, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsc64553.2025.10968868> (in English)
12. Kaur, J., Parmar, K. S., & Singh, S. (2023). Autoregressive models in environmental forecasting time series: a theoretical and application review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 19617-19641. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25148-9> (in English)
13. Kashif, K., & Ślepaczuk, R. (2025). LSTM-ARIMA as a hybrid approach in algorithmic investment strategies. *Knowledge-Based Systems*, 320, 113563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113563> (in English)
14. Kirichenko, L., Radivilova, T., & Stepanenko, J. (2021, April). Applying recurrence plots to classify time series. *Computational Linguistics and Intelligent Systems*. In *Proceedings of the 5th International Conference, COLINS-2021*. (pp. 16-26). Kharkiv, Ukraine. Retrieved from https://web.kpi.kharkov.ua/iks/wp-content/uploads/sites/113/2021/10/CoLInS_Volume2_2021.pdf (in English)
15. Konar, S., Auluck, N., Ganesan, R., Goyal, A. K., Kaur, T., Sahi, M., Samra, T., Thingnam, S. K. S., & Puri, G. D. (2022). A non-linear time series based artificial intelligence model to predict outcome in cardiac surgery. *Health Technology*, 12(6), 1169-1181. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12553-022-00706-2> (in English)
16. Kontopoulou, V. I., Panagopoulos, A. D., Kakkos, I., & Matsopoulos, G. K. (2023). A review of ARIMA vs. machine learning approaches for time series forecasting in data driven networks. *Future Internet*, 15(8), 255. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15080255> (in English)
17. Lee, C.-M., & Ko, C.-N. (2011). Short-term load forecasting using lifting scheme and ARIMA models. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5902-5911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.033> (in English)
18. Meenakshi, M., & Gowrisankar, A. (2025). Multifractal analysis on ozone depletion and climate change: the time series approaches. *Contemporary Mathematics*, 6(1), 594-616. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.6120256141> (in English)
19. Mensi, W., Kumar, A. S., Vo, X. V., & Kang, S. H. (2024). Asymmetric multifractality and dynamic efficiency in DeFi markets. *Journal of Economic and Financial Studies*, 48(2), 280-297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12197-023-09655-6> (in English)

20. Monge, M., & Infante, J. (2023). A fractional ARIMA (ARFIMA) model in the analysis of historical crude oil prices. *Energy RESEARCH LETTERS*, 4(1). DOI: <https://doi.org/10.46557/001c.36578> (in English)
21. Oktaviani, F., Miftahuddin, & Setiawan, I. (2021). Forecasting sea surface temperature anomalies using the SARIMA ARCH/GARCH model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1882, 012020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012020> (in English)
22. Ouma, Y. O., Cheruyot, R., & Wachera, A. N. (2022). Rainfall and runoff time-series trend analysis using LSTM recurrent neural network and wavelet neural network with satellite-based meteorological data: case study of Nzoia hydrologic basin. *Complex & Intelligent Systems*, 8(1), 213-236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00365-2> (in English)
23. Park, M.-J., & Yang, H.-S. (2024). Comparative Study of Time Series Analysis Algorithms Suitable for Short-Term Forecasting in Implementing Demand Response Based on AMI. *Sensors*, 24(22), 7205. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24227205> (in English)
24. Pramanik, A., Sultana, S., & Rahman, Md. S. (2022, October). Time series analysis and forecasting of Monkey-pox disease using ARIMA and SARIMA model. In *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-7). Kharagpur, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/icccnt54827.2022.9984345> (in English)
25. Ray, S., Das, S. S., Mishra, P., & Al Khatib, A. M. G. (2021). Time series SARIMA modelling and forecasting of monthly rainfall and temperature in the South Asian countries. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 531-546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00205-w> (in English)
26. Salem, F. M. (2022). Recurrent Neural Networks (RNN). In *Recurrent Neural Networks*. (pp. 43-67). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89929-5_3 (in English)
27. Saraswat, M., & Srishti. (2022). Leveraging genre classification with RNN for book recommendation. *International Journal of Information Technology*, 14(7), 3751-3756. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41870-022-00937-6> (in English)
28. Serletis, A., & Rosenberg, A. A. (2007). The Hurst exponent in energy futures prices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380, 325–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.055> (in English)
29. Shabani, M., Magris, M., Tzagkarakis, G., Kannianen, J., & Iosifidis, A. (2023). Predicting the state of synchronization of financial time series using cross recurrence plots. *Neural Computing and Applications*, 35(25), 18519-18531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08674-y> (in English)
30. Shakhovska, N., Shymanskyi, V., & Prymachenko, M. (2025). FractalNet-LSTM model for time series forecasting. *Computers, Materials & Continua*, 82(3), 4469-4484. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.062675> (in English)
31. Shen, J., Liu, F., Tu, Y., & Tang, C. (2021). Finding gene network topologies for given biological function with recurrent neural network. *Nature Communications*, 12, 3125. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23420-5> (in English)
32. Shynkarenko, K., Lytvynenko, R., Chyhir, I., & Nikitina, I. (2020). Modeling of lightning flashes in thunderstorm front by constructive production of fractal time series. In *Advances in Intelligent Systems and Computing IV*, 1080, 173-185. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_13 (in English)
33. Shynkarenko, V., & Zhadan, A. (2020). Modeling of the deterministic fractal time series by one rule constructors. In *Proceedings of the 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 336-339). Zbarazh, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1109/csit49958.2020.9321923> (in English)
34. Sohaïl, A., Afroz, H., Singh, J. N., Goel, D., & Jasim, L. H. (2024). Stock price prediction using LSTM. In *Proceedings of the 2024 1st International Conference on Advances in Computing, Communication and Networking (ICAC2N)* (pp. 48-53). Greater Noida, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/icac2n63387.2024.10895015> (in English)
35. Srihari G., Kusuma T., Chetanraj D. B., Kumar J. P. S., & Aluvala R. (2024). Predictive modeling of return volatility in sustainable investments: An in-depth analysis of ARIMA, GARCH, and ARCH techniques. *Investment Management and Financial Innovations*, 21(1), 213. DOI: [https://doi.org/10.21511/imfi.21\(1\).2024.17](https://doi.org/10.21511/imfi.21(1).2024.17) (in English)
36. Srivastava P., & Mishra P. K. (2021). Stock market prediction using RNN LSTM. In *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)* (pp. 1-5). Bangalore, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/gcat52182.2021.9587540> (in English)
37. Thirunavukarasu, R., & Kotei, E. (2024). A comprehensive review on transformer network for natural and medical image analysis. *Computer Science Review*, 53, 100648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100648> (in English)

38. Toner W., & Darlow L. (2024). An Analysis of Linear Time Series Forecasting Models. *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.14587> (in English)
39. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762> (in English)
40. Wang, H., & Yao, J. (2025). Forecasting carbon emissions in power systems using Autoformer and LSTM: a case study of the Spanish electricity market. In *Proceedings of the 2025 8th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)* (pp. 1445-1450). Wuxi, China. DOI: <https://doi.org/10.1109/ceepe64987.2025.11033988> (in English)
41. Weigend, A. (2018). *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. New York. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429492648> (in English)
42. Wu, H., Xu, J., Wang, J., & Long, M. (2021). Autoformer: decomposition transformers with auto-correlation for long-term series forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 34, 22419-22430. Retrieved from https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2021/file/bcc0d400288793e8bdcd7c19a8ac0c2b-Paper.pdf (in English)
43. Yilmaz, D., & Büyüktaktakın, İ. E. (2023). Learning optimal solutions via an LSTM-optimization framework. *Operations Research Forum*, 4(2), 48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-023-00224-5> (in English)
44. Zha, W., Liu, Y., Wan, Y., Luo, R., Li, D., Yang, S., & Xu, Y. (2022). Forecasting monthly gas field production based on the CNN-LSTM model. *Energy*, 260, 124889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124889> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.08.2025

Прийнята до друку: 16.12.2025

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.424:621.31

Є. С. РЯБОВ^{1*}, Б. Х. ЄРІЦЯН², Є. В. ЛИСЕНКО³, Є. Г. ЧЕРНИШЕНКО⁴, А. Ю. ЖУКОВ⁵

^{1*}Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел.+38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38(057) 707 65 30, ел. пошта bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

³Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38(057) 707 65 30, ел. пошта uevhen.lysenko@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-1263-7446

⁴Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38(057) 707 65 30, ел. пошта uevhen.chernyshenko@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-9476-1107

⁵ТОВ «Харківський електро-машинобудівний завод», пр. Героїв Харкова, 199, 61037, Харків, Україна, тел. +38 (099) 074 01 95, ел. пошта zukant83@gmail.com, ORCID 0009-0001-5229-1685

Підвищення тягових властивостей маневрового тепловозу ЧМЕЗ за рахунок розподілу тягового зусилля між осями тепловозу

Мета. Дослідження присвячене визначенню впливу перерозподілу сили тяги між осями на підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ. **Методика.** Розроблено математичну модель для визначення коефіцієнту використання зчпної маси тепловозу ЧМЕЗ при перерозподілі тягового зусилля між осями тепловозу. Показано, що внаслідок дії сил у зубчатому зачепленні тягових редукторів та дії сили тяги на автозчепленні виникає розвантаження першої, другої та четвертої осей та довантаження третьої, п'ятої та шостої осей за напрямком руху тепловозу. **Результати.** Проведено розрахунки коефіцієнту використання зчпної маси тепловозу при різних значеннях коефіцієнту зчеплення та різних схемах живлення тягових електродвигунів. Визначено, що найбільші значення коефіцієнту використання зчпної маси локомотиву досягаються у випадку індивідуального живлення та керування тяговими електродвигунами. При такому способі живлення можливе найбільш точне врахування фактичного осьового навантаження при перерозподілі тягового зусилля між осями тепловозу. При груповому живленні тягових двигунів, у випадку об'єднання осей з близькими коефіцієнтами використання зчпної маси осі, також досягається практично повне використання зчпної маси. При цьому величина коефіцієнту використання зчпної маси тепловозу є стабільною і практично не залежить від тягового зусилля. При повізковому живленні та у випадку групового живлення усіх електродвигунів коефіцієнт використання зчпної маси змінюється у діапазоні 0,8...0,87, при цьому менші значення досягаються при вищому тяговому зусиллі тепловозу. **Наукова новизна.** Обґрунтовано можливість підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ шляхом перерозподілу тягових зусиль між осями тепловозу з урахуванням перерозподілу фактичного осьового навантаження. Визначено раціональні варіанти схем живлення тягових електродвигунів, при яких забезпечується високий коефіцієнт використання зчпної маси тепловозу. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використанні при модернізації тепловозів ЧМЕЗ, що дозволяє підвищити їх тягові властивості. Запропонований підхід до покращення тягових властивостей може бути застосований для іншого тягового рухомого складу.

Ключові слова: тягово-енергетичні характеристики; тягові властивості; коефіцієнт використання зчпної маси; тяговий електропривод; тяговий електродвигун; енергоефективність

Вступ

На початкових та завершальних етапах залізничних перевезень здійснюються маневрові операції із застосуванням маневрових локомотивів. На станціях АТ «Укрзалізниця» для цього використовуються маневрові тепловози серії ЧМЕЗ. Наявний парк цих тепловозів характеризується значними термінами служби та недостатньо високими тягово-енергетичними показниками [3]. Усунення цього можливе шляхом модернізації наявних тепловозів ЧМЕЗ. Відомі проекти модернізації цих тепловозів від компанії CZ LOKO [9] та ZOS Zvolen s.r.o. [15], які спрямовані у першу чергу на підвищення паливної ефективності, що досягається застосуванням сучасних дизельних двигунів. Покращення тягових властивостей модернізованих тепловозів ЧМЕЗ пов'язане із застосуванням тягової електричної передачі потужності змінно-постійного струму та мікропроцесорної системи керування, що підвищує протибоксувальні властивості тепловозу.

Іншим напрямком підвищення тягово-енергетичних властивостей тепловозу ЧМЕЗ є удосконалення його тягового електроприводу. У [7] показано, що для наявних тепловозів серії ЧМЕЗ підвищення їх енергоефективності може бути досягнуто при зміні кількості працюючих тягових електродвигунів в залежності від позиції контролера машиніста. На серійних тепловозах ЧМЕЗ такий алгоритм роботи не передбачений, однак його можна впровадити при модернізації тепловозів [12]. Слід очікувати, що при використанні тягового електроприводу з електродвигунами змінного струму та впровадженні подібних енергозберігаючих алгоритмів керування багатодвигунним тяговим електроприводом [13] буде досягнуто значне підвищення енергетичних показників тепловозу. Зважаючи на тенденції до зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог, використання енергозберігаючих технологій на рухомому складі забезпечить стабільність та конкурентоспроможність залізничних перевезень.

При використанні тягового електроприводу з електродвигунами змінного струму доцільним є провадження перерозподілу сили тяги між осями, що підвищує тягові властивості тепловозу [8]. Це необхідно для роботи з поїздами збі-

льшеної вагової норми, при вивізній та передачній роботі.

Як відомо, при реалізації сили тяги відбувається перерозподіл навантаження між осями локомотиву: навантаження одних осей зменшується, а інших – збільшується відносно статичного значення. Перерозподіл залежить від конструкції екіпажної частини [6, 11, 14]. Це викликає необхідність зниження сили тяги на розвантажених осях. Тому при груповому живленні тягових електродвигунів, яке застосовується на серійному тепловозі ЧМЕЗ, найбільша сила тяги визначається розвантаженням певних осей.

При використанні індивідуального живлення і регулювання тягових електродвигунів або окремих груп з'являється можливість перерозподілу тягового зусилля між колісними парами. Зокрема, можливе підвищення сили тяги на тих осях, які будуть довантажени. Це дозволить підвищити силу тяги локомотиву в цілому.

Мета

Метою статті є визначення впливу перерозподілу сили тяги між осями на підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ.

Методика

Для визначення впливу перерозподілу сил тяги між осями на тягові властивості локомотиву використаємо методику визначення коефіцієнту зчіпної маси локомотиву [1, 5, 10].

Статичний коефіцієнт використання зчіпної маси локомотиву визначається за виразом:

$$\beta = \frac{Q_{\min}}{Q_0} \quad (1)$$

де Q_{\min} – найменше осьове навантаження колісної пари; Q_0 – статичне навантаження колісної пари.

Вираз (1) записаний для варіанту групового живлення тягових електродвигунів, при якому не можливо перерозподіляти силу тяги між осями [2, 4].

Для випадку, коли тяговий електропривод дозволяє перерозподіляти силу тяги між осями, статичний коефіцієнт використання зчіпної маси пропонується визначати за наступним виразом:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n F_{i\max}}{nF_0}, \quad (2)$$

де $F_{i\max}$ – гранична сила тяги i -ої колісної пари; n – кількість осей локомотиву, якими здійснюється тяга; F_0 – гранична сила тяги однієї осі при статичному навантаженні.

Граничне значення сили тяги i -ої колісної пари визначається за виразом:

$$F_{i\max} = \Psi_i Q_i, \quad (3)$$

де Ψ_i – коефіцієнт зчеплення i -ої колісної пари; Q_i – фактичне навантаження i -ої колісної пари з урахуванням перерозподілу навантаження.

У виразі (3) не враховуються динамічні процеси при коливаннях підресорених мас, які призводять до зміни вертикального навантаження на колісну пару. Для врахування цього необ-

хідне комплексне дослідження на основі моделювання.

Граничне значення сили тяги i -ої колісної пари визначається за виразом:

$$F_0 = \Psi_0 Q_0, \quad (4)$$

де Ψ_0 – коефіцієнт зчеплення колісної пари при статичному навантаженні.

При попередніх розрахунках, для їх спрощення, можна прийняти, що коефіцієнти зчеплення рівні між собою [1, 4].

В конструкції тепловозу ЧМЕЗ передбачено спирання кузова на візки через маятникові підвіски. Нехтуючи пружністю гумових елементів, які передбачені в конструкції маятникових гвинтів, можна прийняти, що спирання кузова на візки є жорстким і візки не можуть переміщуватися відносно кузова у вертикальній поздовжній площині.

На рис. 1 показано схему прикладення сил у тяговому режимі.

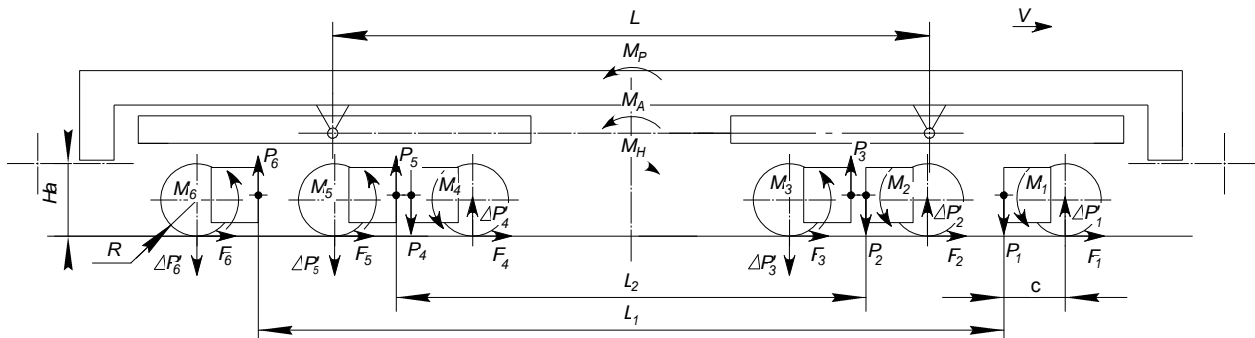


Рис. 1. Схема сил і моментів

Fig. 1. Diagram of forces and moments

Зміна навантаження колісної пари обумовлена двома факторами: перший – передача обертаючого моменту, при якому внаслідок тиску зуба шестерні на зуб зубчастого колеса виникають додаткові навантаження на підвісі тягового двигуна та осі колісної пари; другий – передачею сили тяги через автозчеплення.

Зміна навантаження колісної пари від дії сил та моментів, що передаються на неї через корпус двигуна та тягових редукторів, за величиною дорівнює додатковим навантаженням на підвісі тягового двигуна відповідної колісної пари [1]. Відповідно до розташування тягових двигунів

відносно колісних пар виникають розвантаження I, II та IV-ї колісної пари за напрямком руху. Для III, V та VI-ї колісної пари за напрямком руху виникає довантаження. Таким чином:

$$\begin{cases} \Delta P'_1 = -P_1 \\ \Delta P'_2 = -P_2 \\ \Delta P'_3 = P_3 \\ \Delta P'_4 = -P_4 \\ \Delta P'_5 = P_5 \\ \Delta P'_6 = P_6 \end{cases}, \quad (5)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де P_1, \dots, P_6 – додаткові навантаження на підвісі тягового двигуна, що виникають при передачі крутильного моменту внаслідок тиску зуба шестерні на зуб зубчастого колеса.

Розрахунок додаткових навантажень здійснюється за виразом:

$$P_i = \frac{F_i R}{c}. \quad (6)$$

де F_i – сила тяги i -ої колісної пари; R – радіус по колу кочення колісної пари; c – відстань від підвісу тягового двигуна до осі колісної пари.

Момент, який виникає на рамі тепловозу від дії навантажень на опорах тягових двигунів, може бути оцінений наступним виразом:

$$M_n = \frac{(P_1 + P_6)L_1}{2} + \frac{((P_5 - P_4) + (P_2 - P_3))L_2}{2}, \quad (7)$$

де L_1 – відстань між точками підвісу першого та шостого тягових електродвигунів; L_2 – відстань між точками підвісу другого та п'ятого тягових електродвигунів.

У виразі (7) прийнято, що точки підвісу другого та третього, четвертого та п'ятого електродвигунів знаходяться на однаковій відстані від осі тепловозу.

Момент, який виникає на рамі тепловозу від передачі тягового зусилля через автотзчеплення:

$$M_a = -\left(\sum_{i=1}^n F_i\right)(H_A - R), \quad (8)$$

де H_A – висота осі автотзчеплення.

Загальний момент на головній рамі тепловозу:

$$M_p = M_a + M_n. \quad (9)$$

Різниця навантаження на колісні пари візків від дії моменту на головній рамі локомотива визначаються відповідно за виразами:

$$\begin{cases} \Delta P_{e1} = -\frac{M_p}{3L} \\ \Delta P_{e2} = \frac{M_p}{3L} \end{cases}, \quad (10)$$

де L – база локомотива по шкворням.

Додаткові навантаження на колісні пари локомотива розраховуються наступним чином:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P_{e1} + \Delta P'_1 \\ \Delta P_2 = \Delta P_{e1} + \Delta P'_2 \\ \Delta P_3 = \Delta P_{e1} + \Delta P'_3 \\ \Delta P_4 = \Delta P_{e2} + \Delta P'_4 \\ \Delta P_5 = \Delta P_{e2} + \Delta P'_5 \\ \Delta P_6 = \Delta P_{e2} + \Delta P'_6 \end{cases}. \quad (11)$$

Фактичне навантаження на колісні пари визначається як:

$$Q_i = Q_0 + \Delta P_i. \quad (12)$$

Таким чином, вирази (2)–(12) складають математичну модель для визначення коефіцієнту використання зчіпної маси.

Результати

Геометричні розміри тепловозу ЧМЕЗ, необхідні для проведення розрахунків, наведено у табл. 1.

З використанням запропонованої математичної моделі проведено розрахунки коефіцієнту використання зчіпної маси для серійного тепловозу (при штатній схемі включення тягових електродвигунів з груповим живленням). Результати розрахунків наведено у табл. 2. Як видно з даних табл. 2, зі зростанням сили тяги коефіцієнт використання зчіпної маси тепловозу зменшується, що негативно впливає на його тягові властивості. Для прикладу у табл. 3 наведені коефіцієнти використання зчіпної маси для окремих осей при силі тяги 240 кН (тобто сила тяги кожної осі – 40 кН). Як видно з даних табл. 3, найбільш розвантаженою є четверта вісь, а також перша та третя осі. Це виникає внаслідок «відтискання» колісної пари зусиллями у зубчастому зачепленні. Найбільш навантаженими є третя, п'ята та шоста колісна пара, що є наслідок їх «притискання» як силами у зубчастому зачепленні, так і довантаженням заднього візка від сили на автотзчепленні.

Внаслідок особливостей встановлення третього та четвертого колісно-моторного блоку на передньому та задньому візку відповідно третя вісь виявляється довантаженою, а четверта – розвантаженою. Вказаний характер розподілу розвантажень і довантажень колісних

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

пар буде зберігатися і при інших значеннях сили тяги, але будуть змінюватися їх чисельні значення.

Таким чином, для підвищення тягових властивостей тепловозу необхідно збільшити сили тяги п'ятої, шостої та третьої осі, які виявля-

ються довантаженими у тягових режимах. Додільно провести розрахунки граничних значень коефіцієнта використання зчипної маси локомотиву, що дозволить оцінити вплив перерозподілу сили тяги між осями локомотиву на підвищення його тягових властивостей.

Таблиця 1

**Геометричні розміри тепловозу ЧМЕЗ
(за даними технічної документації)**

Table 1

**Geometric dimensions of the ChME3 diesel locomotive
(according to technical documentation)**

Найменування	Величина
Радіус колеса по колу кочення R , м	0,525
Відстань від точки підвісу тягового двигуна до осі колісної пари c , м	0,891
Висота осі автозчеплення від рівня головок рейок H_A , м	1,055
База локомотива по шкворням L , м	8,66
Відстань між точками підвісу першого та шостого тягових електродвигунів, L_1 (м)	10,8
Відстань між точками підвісу першого та шостого тягових електродвигунів, L_2 (м)	6,88
Статичне навантаження на вісь, Q_0 (кН)	201,1

Таблиця 2

**Результати розрахунків коефіцієнту використання
зчипної маси для серійного тепловозу**

Table 2

**Results of calculations of the coefficient of adhesion weight
for a serial diesel locomotive**

Сила тяги тепловозу, кН	Коефіцієнт використання зчипної маси тепловозу	Найбільший коефіцієнт використання зчипної маси осі
240	0,858	1,142
270	0,841	1,159
300	0,823	1,177
330	0,805	1,195
360	0,788	1,212
390	0,77	1,23
420	0,752	1,248

Коефіцієнти використання зчіпної маси при силі тяги однієї осі, рівній 40 кН

Table 3

Coefficients of adhesion weight at a single axle tractive effort of 40 kN

Номер осі	I	II	III	IV	V	VI
Коефіцієнт використання зчіпної маси осі	0,907	0,907	1,142	0,858	1,093	1,093

Для визначення граничних сил тяги, які можна реалізувати кожною віссю у випадку перерозподілу тяги між осями, застосовано наведений нижче алгоритм, який включає послідовність дій:

1. Задати значення сили тяги для кожної осі F_{31}, \dots, F_{36} .

2. Обчислити фактичне навантаження колісних пар за моделлю (5)–(12).

3. Обчислити граничні значення сили тяги за (3) при заданому коефіцієнті зчеплення та порівняти із заданими значеннями сили тяги F_{31}, \dots, F_{36} . Шляхом зміни значень F_{31}, \dots, F_{36} досягти рівності цих сил граничним значенням, розрахованим за (3).

4. Обчислити силу тяги при статичному навантаженні за (4).

5. Обчислити коефіцієнт використання зчіпної маси локомотиву за (2).

Розрахунки проведено при різних значення коефіцієнту зчеплення та при різних варіантах живлення тягових електродвигунів. Розглянуто індивідуальне та групове живлення тягових електродвигунів. При індивідуальному живленні можливо досягти повного врахування перерозподілу осьових навантажень. Однак такий варіант потребує індивідуального живлення і керування кожним електродвигуном, що підвищує вартість тягового електроприводу.

При груповому живленні і керуванні електродвигуни об'єднуються у кілька груп, кожна з яких отримує живлення від окремого перетворювача. Це зменшує вартість тягового електроприводу. Однак слід зазначити, що через розкид характеристик електродвигунів навантаження електродвигунів в одній групі не може бути ідентичним. Це буде зменшувати тягові зусилля окремих осей. У цій роботі це аспект не враховується.

У дослідженні розглянуто такі варіанти групового живлення:

а) групове живлення усіх тягових електродвигунів. Це відповідає серійному тепловозу;

б) групове повізкове живлення, при якому три електродвигуни кожного з візків під'єднуються до тягового перетворювача;

в) групове живлення трьох груп електродвигунів, в якій є два електродвигуни. Електродвигуни з'єднані у групи наступним чином: I та II, III та IV, V та VI;

г) групове живлення двох груп електродвигунів по три електродвигуна. Електродвигуни з'єднані у групи наступним чином: I, II та IV, III, V та VI.

З'єднання електродвигунів за варіантами в) і г) має на меті об'єднати осі з близькими коефіцієнтами використання зчіпної маси.

У табл. 4–6 наведено результати розрахунків граничних сил тяги і коефіцієнта використання зчіпної маси для різних значень коефіцієнту зчеплення при різних варіантах живлення. З даних табл. 4–6 та рис. 2 слідує, що найвищі значення коефіцієнта використання зчіпної маси локомотиву досягаються при індивідуальному живленні. В цьому випадку можливе окреме керування кожним електродвигуном з урахуванням фактичного навантаження осей. Слід відзначити, що при високих значення сили тяги коефіцієнт використання зчіпної маси стає більшим одиниці. Це є наслідком довантаження заднього візка силою на автозчепленні. Найменші коефіцієнти використання зчіпної маси локомотиву є при груповому живленні усіх електродвигунів (варіант а) та по візковому живленні (варіант б). Це пояснюється тим, що у складі кожної групи є осі з низькими коефіцієнтами використання зчіпної маси і відповідно такі осі обмежують величину сили тяги решти осей, які входять до цієї

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

групи. Найнижчі значення коефіцієнту використання зчпної маси, рівні 0,8...0,847, досягаються при груповому живленні усіх електродвигунів. При по візковому живленні коефіцієнт ви-

користання зчпної маси знаходиться у діапазоні 0,828...0,87. При цьому з ростом загального тягового зусилля коефіцієнт використання зчпної маси локомотиву зменшується.

Таблиця 4

Граничні значення сил тяги при коефіцієнті зчеплення $\psi=0,25$

Table 4

Limit values of traction forces at a coefficient of adhesion $\psi=0.25$

Варіанти живлення	Сила тяги, кН							β
	Номер осі						Загальна	
	I	II	III	IV	V	VI		
Індивідуальне	45,1	45,1	60,0	42,4	57,1	57,1	306,8	1,014
Групове (всі електродвигуни)	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	255,6	0,847
Групове по візкове	44,9	44,9	44,9	42,6	42,6	42,6	262,5	0,87
Групове по два електродвигуни (I+II, III+IV, V+VI)	45,5	45,5	42,0	42,0	56,5	56,5	295,0	0,955
Групове по три електродвигуни (I+II+IV, III+V+VI)	42,5	42,5	57,1	42,5	57,1	57,1	298,8	0,99

Таблиця 5

Граничні значення сил тяги при коефіцієнті зчеплення $\psi=0,3$

Table 5

Limit values of traction forces at a coefficient of friction $\psi=0.3$

Варіанти живлення	Сила тяги, кН							β
	Номер осі						Загальна	
	I	II	III	IV	V	VI		
Індивідуальне	53,1	53,1	75,9	49,3	70,5	70,5	372,4	1,029
Групове (всі електродвигуни)	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	298,2	0,824
Групове по візкове	52,8	52,8	52,8	49,6	49,6	49,6	307,2	0,849
Групове по два електродвигуни (I+II, III+IV, V+VI)	53,8	53,8	48,7	48,7	69,5	69,5	344,0	0,95
Групове по три електродвигуни (I+II+IV, III+V+VI)	49,4	49,4	70,6	49,4	70,6	70,6	360,0	0,995

Граничні значення сил тяги при коефіцієнті зчеплення $\psi=0,35$

Table 6

Limit values of traction forces at a coefficient of adhesion $\psi=0.35$

Варіанти живлення	Сила тяги, кН						β	
	Номер осі							Загальна
	I	II	III	IV	V	VI		
Індивідуальне	60,8	60,8	92,4	55,8	84,8	84,8	441,5	1,04
Групове (всі електродвигуни)	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	337,8	0,8
Групове по візкове	60,4	60,4	60,4	56,3	56,3	56,3	349,8	0,828
Групове по два електродвигуни (I+II, III+IV, V+VI)	61,9	61,9	54,7	54,7	83,2	83,2	399,6	0,946
Групове по три електродвигуни (I+II+IV, III+V+VI)	55,8	55,8	84,8	55,8	84,8	84,8	421,8	1,0

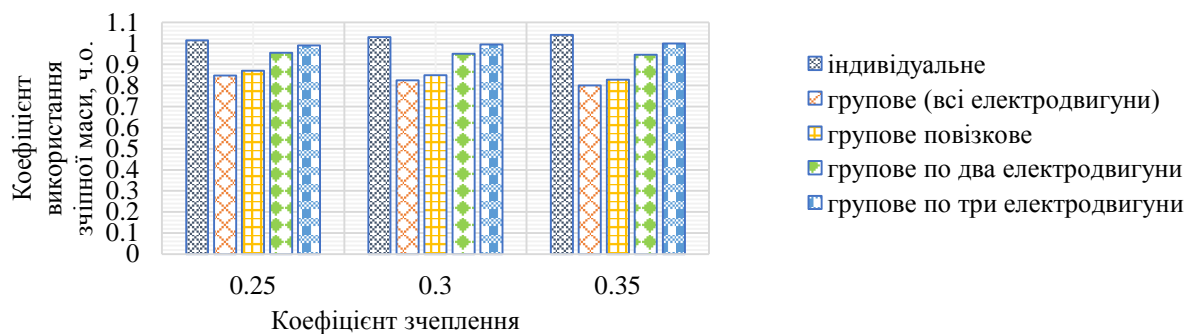


Рис. 2. Залежність коефіцієнту використання зчпної маси локомотиву при різних коефіцієнтах зчеплення та варіантах живлення тягових електродвигунів

Fig. 2. Dependence of the coefficient of adhesion weight for different adhesion coefficients and traction motor power supply options

Високі коефіцієнти використання зчпної маси локомотиву, рівні 0,99...1,0, досягаються при груповому живленні варіанті 2, який передбачає дві групи з об'єднанням у групи електродвигунів I, II та IV, III, V та VI осей. У варіанті 6, який передбачає три групи з об'єднанням у групи електродвигунів I та II, III та IV, V та VI осей, коефіцієнти використання зчпної маси знаходяться у діапазоні 0,946...0,95. Високі значення коефіцієнту використання зчпної маси для цих варіантів живлення пояснюється тим, що у межах однієї групи об'єднуються осі з близькими навантаженнями. Це забезпечує високі значення загального тягового зусилля таких

груп, при цьому коефіцієнт використання зчпної маси практично не змінюється при зміні загального тягового зусилля. Таким чином, проведені розрахунки показують можливість підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЗ при використанні перерозподілу тягових зусиль між осями локомотиву з урахуванням їх фактичного навантаження. Це дозволяє забезпечити коефіцієнт використання зчпної маси близьким до одиниці. Найвищі показники коефіцієнту використання зчпної маси досягаються при індивідуальному живленні та груповому живленні у варіантах з двома групами (до однієї групи входять

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

електродвигуни I, II та IV осей, до другої – електродвигуни III, V та VI осей) та з трьома групами (з об'єднанням у групи електродвигунів I та II, III та IV, V та VI осей). При індивідуальному та груповому живленні з трьома групами сила тяги однієї осі досягає 84,8 кН. При груповому живленні з трьома групами електродвигунів найбільша сила тяги однієї осі становить 83,2 кН. Фактичне осьове навантаження у цих режимах складає близько 240 кН. Для вибору варіанту групового живлення необхідно врахувати показники енергоефективності, вартість тягового електроприводу та фактори, які пов'язані з безпекою руху при реалізації алгоритму перерозподілу тягових зусиль.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано можливість підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ шляхом встановлення тягових зусиль осей тепловозу з урахуванням перерозподілу фактичного осьового навантаження. Визначено раціональні варіанти схем живлення тягових електродвигунів, при яких забезпечується високий коефіцієнт використання зчипної маси тепловозу.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості їх використання при модернізації тепловозів, що дозволяє підвищити їх тягові властивості.

Висновки

Підвищення тягово-енергетичних показників маневрових тепловозів необхідне для забезпечення стабільного виконання маневрової роботи.

Підвищення тягових властивостей маневрових локомотивів може бути здійснено засобами тягового електроприводу. Впровадження керування силою тяги окремих осей чи їх груп дозволяє враховувати перерозподіл навантаження між осями локомотиву при реалізації сили тяги. Внаслідок цього можливе підвищення загальної сили тяги локомотиву.

Виконані розрахунки показують, що при індивідуальному живленні тягових електродвигунів та у випадках групового живлення з об'єднанням кількох електродвигунів можливе досягнення величини коефіцієнту використання зчипної маси локомотиву, близької до одиниці. Це свідчить про максимальне використання тягових властивостей тепловозу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбунов М. І. *Теорія та практична реалізація системного підходу при створенні екіпажної частини локомотива* : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Луганськ, 2006. 422 с.
2. Горобченко О. М. *Удосконалення тягових характеристик локомотивів шляхом підвищення коефіцієнта використання зчипної маси* : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.22.07. Харків, 2007. 18 с.
3. Кара С. В., Петренко В. О., Прокопенко П. М., Гордієнко Т. М. Дослідження несучих конструкцій тепловозів серії ЧМЕЗ та визначення можливості продовження терміну їх експлуатації. *Залізничний транспорт України*. 2019. № 3. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-09-13>
4. Ковтанець М. В., Кузьменко С. В., Ноженко В. С., Сергієнко О. В., Климаш А. О., Ковтанець Т. М. Шляхи покращення тягових і динамічних показників локомотива. *Вісник східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2021. № 4(268). С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-53-58>
5. Кравченко К. О. *Обґрунтування резервів підвищення тягових якостей локомотива та їх реалізація керуванням ковзання в системі колеса з рейкою* : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Луганськ, 2010. 188 с.
6. Маслів В. Г. *Сучасні конструкції та динаміка рухомого складу залізниць* : навч. посіб. Харків : НТУ “ХПІ”, 2014. 106 с.
7. Шайда В. П., Юр'єва О. Ю., Лисенко Є. В., Сич О. А. Підвищення енергетичної ефективності тягового колекторного електроприводу для маневрових тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2024. № 2(18). С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2024.02.10>
8. Шапран Е. Н. Удосконалення систем керування тяговими електродвигунами тепловозів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2005. № 8. С. 122–129. URL: <https://stp.ust.edu.ua/article/view/20156/17786>
9. Locomotion Excellence. *CZ LOKO*. URL: <https://www.czloko.com/> (date of access: 20.09.2025).

10. Gerlici J., Kravchenko K., Gorbunov M., Lack T. Increasing the Traction Properties of Locomotives for the Account of Improvement of Body and Bogies Connexions. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7, Iss. 4.3. P. 377–382. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19837>
11. Ishchuk V., Kravchenko K., Blatnický M., Lovska A., Dižo J. Research into the Possibilities of Improving the Adhesion Properties of a Locomotive. *Machines*. 2025. Vol. 13, Iss. 1. P. 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13010044>
12. Kostenko, I., Nezlina O., Maliuk S., Lysenko Y., Popovich, D. Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*. 2024. № 43. P. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>
13. Riabov Ie., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>
14. Semenov S., Mikhailov E., Spivak O., Dižo J., Blatnický M., Bučko M. Features of Locomotive Adhesive Mass Utilization in a Braking Mode. *Manufacturing Technology Journal*. 2025. Vol. 25, Iss. 3. P. 374–382. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2025.040>
15. Everything that rides on the rails. *ZOS Zvolen*. URL: <https://zoszvolen.sk/en/> (date of access: 20.09.2025)

YE. S. RIABOV^{1*}, B. KH. YERITSYAN², YE. V. LYSENKO³, YE. G. CHERNYSHENKO⁴,
A. YU. ZHUKOV⁵

^{1*}Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 302 14 54, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

³Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail yevhen.lysenko@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-1263-7446

⁴Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail yevhen.chernyshenko@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-9476-1107

⁵Kharkiv Electric Machine Building Plant LLC, Heroiv Kharkova Av., 199, 61037, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (099) 074 01 95, e-mail zukant83@gmail.com, ORCID 0009-0001-5229-1685

Improving the Traction Properties of the Shunting Diesel Locomotives ChME3 by Distributing the Traction Force Between the Axles of the Diesel Locomotive

Purpose. Research into the specific determination of the influence of redistribution of traction force between axles on increasing the traction properties of the ChME3 diesel locomotive. **Methodology.** A mathematical model has been developed to determine the coefficient of utilization of the coupling mass of the ChME3 diesel locomotive when redistributing the tractive effort between the axles of the diesel locomotive. It is shown that as a result of the action of forces in the gear meshing of traction reducers and the action of the traction force on the automatic coupling, the unloading of the first, second, and fourth axles and the loading of the third, fifth, and sixth axles occurs in the direction of movement of the locomotive. **Finding.** Calculations of the coefficient of utilization of the traction mass of a diesel locomotive were carried out at different values of the coefficient of coupling and different schemes of power supply of traction electric motors. It was determined that the highest values of the coefficient of utilization of the traction mass of a locomotive are achieved in the case of individual power supply and control of traction electric motors. This method of power supply allows for the most accurate consideration of the actual axle load when redistributing the tractive effort between the axles of the locomotive. With group power supply of traction motors, in the case of combining axles with close axle coupling mass utilization coefficients, almost full utilization of coupling mass is also achieved. At the same time, the value of the coefficient of utilization of the traction mass of the diesel locomotive is stable and practically does not depend on the traction force. With by-bogie power supply and group power supply of all electric motors, the coupling mass utilization coefficient varies in the range of 0.8...0.87, with lower values being achieved at higher traction force of the diesel locomotive. **Originality.** The possibility of increasing the traction properties of the ChME3 diesel locomotive by redistributing traction forces between the axles of the diesel locomotive,

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

taking into account the redistribution of the actual axle load, is substantiated. Rational options for power supply schemes for traction electric motors have been identified, which ensure a high utilization factor of the traction mass of the diesel locomotive. **Practical value.** The results obtained can be used in the modernization of ChME3 diesel locomotives, which allows to increase their traction properties. The proposed approach to improving traction properties can be applied to other traction rolling stock.

Keywords: traction and energy characteristics; traction properties; coupling mass utilization factor; traction electric drive; traction electric motor; energy efficiency

REFERENCE

- Ghorbunov, M. I. (2006). *Teoriia ta praktychna realizatsiia systemnoho pidkhodu pry stvorenni ekipazhnoi chastyny lokomotyva* (Doctoral dissertation). Luhansk. (in Ukrainian)
- Horobchenko, O. M. (2007). *Udoskonalennia tiahovykh kharakterystyk lokomotyviv shliakhom pidvyshchennia koefitsiienta vykorystannia zchipnoi masy* (Extended abstract dissertation). Kharkiv. (in Ukrainian)
- Kara, S. V., Petrenko, V. O., Prokopenko, P. M., & Hordiienko, T. M. (2019). Study of load-bearing structures diesel locomotives of the ChME3 series and determination of the possibility of extending their service life. *Railway transport of Ukraine*, 3, 9-13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-09-13> (in Ukrainian)
- Kovtanets, M. V., Kuzmenko, S. V., Nozhenko, V. S., Sergienko, O. V., Klimash, A. O., & Kovtanets, T. M. (2021). Ways to improve traction and dynamic performance of a locomotive. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 4(268), 53-58. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-53-58> (in Ukrainian)
- Kravchenko, K. O. (2010). *Obgruntuvannia rezerviv pidvyshchennia tiahovykh yakosteï lokomotyva ta yikh realizatsiia keruvanniam kovzannia v systemi koleasa z reikoïu* (Candidate of technical sciences dissertation). Luhansk. (in Ukrainian)
- Masliiev, V. H. (2014). *Suchasni konstruktsii ta dynamika rukhomoho skladu zaliznyts*. Kharkiv: NTU «KhPI». (in Ukrainian)
- Shaïda, V. P., Yurïeva, O. Yu., Lysenko, Ye. V., & Sych, O. A. (2024). Increasing the energy efficiency of the traction collector electric drive for shunting diesel locomotives. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 2(18), 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2024.02.10> (in Ukrainian)
- Shapran, E. N. (2005). Udoskonalennia system keruvannia tiahovymy elektrodvyhunamy teplovoziv. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 8, 122-129. Retrieved from <https://stp.ust.edu.ua/article/view/20156/17786> (in Ukrainian)
- Locomotion Excellence. (б. д.). *CZ LOKO*. Retrieved from <https://www.czloko.com/> (in Czech)
- Gerlici, J., Kravchenko, K., Gorbunov, M., & Lack, T. (2018). Increasing the Traction Properties of Locomotives for the Account of Improvement of Body and Bogies Connexions. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.3), 377-382. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19837> (in English)
- Ishchuk, V., Kravchenko, K., Blatnický, M., Lovska, A., & Dižo, J. (2025). Research into the Possibilities of Improving the Adhesion Properties of a Locomotive. *Machines*, 13(1), 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13010044> (in English)
- Kostenko, I., Nezlina, O., Maliuk, S., Lysenko, Y., & Popovich, D. (2024). Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*, 43, 100-110. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8> (in English)
- Riabov, Ie., Goolak, S., Kondratieva, L., & Overianova, L. (2023). Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 42, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416> (in English)
- Semenov, S., Mikhailov, E., Spivak, O., Dižo, J., Blatnický, M., & Bučko, M. (2025). Features of Locomotive Adhesive Mass Utilization in a Braking Mode. *Manufacturing Technology Journal*. 25(3), 374-382. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2025.040> (in English)
- Everything that rides on the rails. (б. д.). *ZOS Zvolen*. Retrieved from <https://zoszvolen.sk/en/> (in English)

Надійшла до редколегії: 20.08.2025

Прийнята до друку: 25.12.2026

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 625.712.35:504.6

Г. І. ГАЙКО^{1*}, І. О. САВЧЕНКО², В. П. ТАРАСЮК³, Д. О. БЕСПАЛОВ⁴

^{1*}Каф. геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, корп. 22, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (050) 921 94 59, ел. пошта gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0002-4263-5958

²Каф. математичних методів системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, корп. 22, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (050) 387 16 88, ел. пошта savil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³Каф. міського будівництва, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037, тел. +38 (097) 396 93 24, ел. пошта tarasyuk90@gmail.com, ORCID 0000-0003-4762-5668

⁴Каф. міського будівництва, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037, тел. +38 (067) 943 51 19, ел. пошта dmitry.bespalov@me.com, ORCID 0000-0002-0778-5627

Автомобільні тунелі як фактор кліматичної нейтральності великого міста

Мета. Визначення пріоритетності розвитку мережі автомобільних тунелів, передбачених у Генеральному плані м. Києва, з урахуванням задач кліматичної нейтральності міста; системне оцінювання впливу автомобільного тунелю на функціонування міста, зміну трафіку та екологічних (кліматичних) показників. **Методика.** Модифікований метод морфологічного аналізу урбанізованих територій, який враховував групи структурно-функціональних і кліматичних (екологічних) факторів та ризиків, зокрема: забруднення повітря (автомобільні викиди), протяжність маршруту сполучення, дорожні затори, шум і динамічні впливи тощо. Транспортна модель м. Києва була представлена у вигляді двох складових – моделі транспортної пропозиції (складається з елементів транспортної системи міста: вулично-дорожня мережа, маршрути громадського транспорту різних типів, зупинки тощо) та моделі транспортного попиту (характеризує цілі вибору режимів і маршрутів переміщень, параметри мобільності населення тощо). Синтез цих двох методик розглядається авторами як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. **Результати.** Розроблено системну модель підтримки прийняття рішень щодо визначення пріоритетності та ранжування (доцільної черговості) будівництва автомобільних тунелів у м. Києві з урахуванням фактору кліматичної нейтральності, проведена порівняльна оцінка й визначений найбільш рейтинговий автомобільний тунель (з трасою від Галицької площі до початку Броварського проспекту). Тестування сценарію введення зазначеного тунелю в транспортну модель м. Києва дозволило оцінити загальні зміни трафіка та довело можливість скорочення викидів CO₂ на понад 4 % від обсягів загальної емісії оксиду вуглецю по місту. **Наукова новизна.** Вперше побудована комплексна морфологічна модель для оцінки системи автомобільних тунелів з урахуванням впливу на ключові фактори ризику, що дозволило оцінити альтернативні конфігурації (сценарії) з урахуванням заданої пріоритетності (ваги) того чи іншого ризику, зокрема – викидів CO₂; розкрита кількісна кореляція між трасою автомобільного тунелю, його впливом на міський трафік та зменшенням викидів CO₂. **Практична значимість.** В роботі на прикладі м. Києва вперше доведений високий вплив автомобільних тунелів на зменшення викидів парникових газів (одночасно з вирішенням низки транспортних, територіальних та безпекових проблем), що дає підстави розглядати розвиток підземної транспортної інфраструктури як вагомому складову забезпечення кліматичної нейтральності та сталого розвитку великих міст. **Грантова підтримка.** Дослідження виконане в рамках рамкової програми Horizon Europe, проєкт «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)», грантова угода: 101148374, і профінансоване Європейським Союзом.

Ключові слова: планування міст; підземне будівництво; кліматична нейтральність; емісія CO₂; автомобільні тунелі; міський трафік; системний аналіз; транспортна модель

Вступ

Для забезпечення процесу системної трансформації великих міст світу та України на шляху до кліматичної нейтральності особливого значення набуває дослідження інноваційних підходів до міського планування, спрямованих на максимальне скорочення викидів парникових газів. Викиди від транспорту в середньому становлять чверть від загальних викидів парникових газів у країнах ЄС, а в містах цей показник сягає до 60...70 % (частина промисловості та енергетики – близько 30...40 %) [3, 10]. Узвичаєними напрямками скорочення транспортних викидів є розвиток автомобільної техніки, зокрема – вдосконалення традиційних двигунів і випуск електромобілів; розширення обсягів перевезень пасажирським транспортом (переважно електричним); поширення велосипедного руху і розвиток міської велосипедної інфраструктури тощо. Зменшення викидів CO₂ стримується тим, що основним видом транспорту й надалі залишається приватний автомобіль, більшість якого працює на бензині або дизельному паливі, і ця тенденція збережеться принаймні у середній перспективі [10, 11]. Тому кліматичний перехід потребує суттєвого вдосконалення міського трафіку, що в умовах майже вичерпаних можливостей збільшення щільності вулично-дорожньої мережі, потребує інноваційних підходів і значною мірою може бути досягнуто розвитком підземної транспортної інфраструктури [1, 9, 12]. Використання міського підземного простору як ефективного інструменту розвантаження вулично-дорожньої мережі та сприяння кліматичній нейтральності міста, спирається на можливості збільшити швидкість транспортного руху не тільки автомобільними тунелями, але й прилеглими (і навіть віддаленими) автомагістралями. Це досягається шляхом перерозподілу транспортних потоків між наземною та підземною інженерно-транспортною інфраструктурою, ліквідацією затримок і навіть простоїв автомобілів, зменшення аварійних ситуацій, а також властивостями автомобільних тунелів забезпечувати найкоротші відстані пересування без перешкод (відсутність перетинів тощо) та змогою відведення та утилізації автомобільних викидів у підземному просторі [1]. Крім того, розвиток підземної інженерно-транспортної інфраструк-

тури в умовах воєнних і терористичних загроз суттєво підвищує безпеку й надійність транспортного сполучення, а транспортні тунелі в разі потреби можуть виконувати функції захисних споруд для цивільного населення [2].

Для збільшення ефективності вулично-дорожньої мережі, поліпшення руху трафіку й зв'язків між окремими районами (зокрема лівим і правим берегами Дніпра) під час розробки різних редакцій і проєктів Генерального плану м. Києва [15], в основному розглядалися 8 варіантів автомобільних тунелів (рис. 1), проте повоєнне відновлення столиці потребує уточнення цих рішень й визначення доцільності й пріоритетності будівництва підземних об'єктів з урахуванням кліматичних і безпекових ризиків.

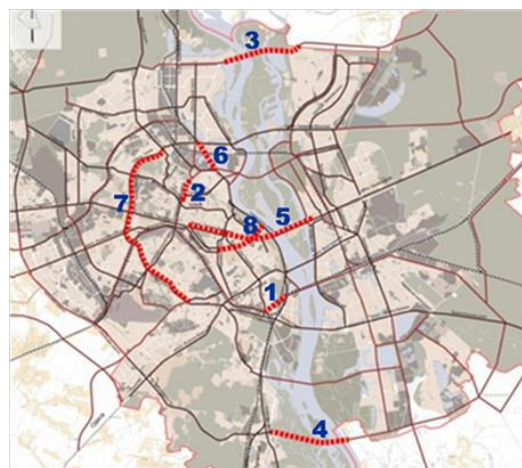


Рис. 1. Схема автомобільних тунелів
Fig. 1. Scheme of car tunnels

Мета

Метою роботи є системна оцінка пріоритетності розвитку мережі автомобільних тунелів з урахуванням задач кліматичної нейтральності міста, а також дослідження впливу найбільш рейтингового автомобільного тунелю на функціонування транспортної системи міста, зміну перерозподілу трафіку, екологічні (кліматичні) показники.

Методика

Оцінювання впливу побудови автомобільного тунелю на функціонування міста є досить складною задачею, що характеризується рядом невизначеностей різної природи.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

По-перше, зони навколо кінців (порталів) автомобільного тунелю можуть бути різномірними, мати просторово розподілені характеристики які по різному визначатимуть ефективність побудови автомобільного тунелю на відповідній ділянці. Крім того, неможливо чітко окреслити межі зони впливу автомобільного тунелю.

По-друге, характеристики можуть також варіюватись у часі: такі фактори, як інтенсивність і середня швидкість дорожнього руху, пропускна здатність вулиць і доріг, можуть змінюватись залежно від часу доби, сезону тощо. Також, оскільки потенційна побудова автомобільного тунелю є майбутньою подією, статистичні дані дають лише приблизну оцінку.

По-третє, деякі важливі характеристики є нечіткими, невимірюваними або суб'єктивно вимірюваними – наприклад, відношення ділянки до центру міста, або належність елемента вулично-дорожньої мережі до критичної інфраструктури.

Через це методи, побудовані на безпосередньому багатокритеріальному оцінюванні – такі як, наприклад, метод аналізу ієрархій, що був застосований в роботі [8], можуть надмірно спрощувати проблему, ігноруючи складні взаємозв'язки між великою кількістю характеристик, які визначають вплив автомобільного тунелю на функціонування транспортної системи міста.

Для повноцінного розгляду цієї задачі пропонується використати модифікований метод морфологічного аналізу (МММА). В цілому, метод морфологічного аналізу застосовувався різними авторами для урбаністичних задач, зокрема для аналізу транспортної системи міста на основі характеристик автомобілів, руху транспорту і стану доріг [14]; створення комплексного підходу до побудови сценаріїв автоматизації, електрифікації і цифровізації транспортного сектору [13]; створення системи оцінювання поточного стану транспортної системи і потенційних переходів між цими станами для міста, з метою конструювання стратегій [6]. Слід зазначити, що морфологічний аналіз в більшості робіт використовується виключно як спосіб структуризації складної проблеми, без розширених аналітичних можливостей.

Авторами статті вже неодноразово успішно використовувалась модифікація методу морфо-

логічного аналізу для складних системних задач, зокрема, пов'язаних із інженерно-транспортною інфраструктурою міста і підземним будівництвом, зокрема оцінювання ділянок будівництва підземних паркінгів [12].

Ідеєю МММА є представлення складних об'єктів з невизначеністю як суперпозицій великої кількості можливих конфігурацій значень заданих параметрів. Для конфігурацій визначаються ймовірності з урахуванням підсилення бо пригнічення деяких пар значень параметрів, що в свою чергу дозволяє визначити більш об'єктивні оцінки параметрів з урахуванням взаємозв'язків між ними. Як правило, за цим слідує другий етап, де на основі розрахованих значень оцінюються альтернативи рішень або наслідків, які вже можуть бути використані в процесі прийняття рішення.

Для даної задачі на першому етапі розглядалися характеристики ділянок навколо кінців (порталів) автомобільного тунелю, тоді як на другому етапі оцінювались параметри, пов'язані з прийняттям рішення щодо доцільності і пріоритетності побудови автомобільного тунелю, зокрема ступеню його впливу на різні фактори ризику.

Для якісного і всебічного оцінювання впливу автомобільного тунелю до набору параметрів на першому етапі пред'являються наступні вимоги:

– набір параметрів має бути достатньо широким і різномірним, охоплюючи більшість аспектів, які важливі для оцінювання впливу автомобільного тунелю;

– при цьому набір параметрів має бути придатний для обробки (до 10 параметрів), і уникати дублювання, тобто не описувати одні й ті ж характеристики;

– кожний параметр повинен бути пов'язаним хоча б із одним із аспектів впливу автомобільного тунелю;

– кожний параметр повинен мати альтернативні значення, такі що в загальному випадку зона впливу автомобільного тунелю не може бути описана лише одним із них через невизначеності, вказані вище;

– параметри повинні являти собою об'єктивні характеристики, навіть якщо їх важко або неможливо виміряти.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В результаті було обрано 10 параметрів, які можна об'єднати в три групи: фактори районування міста (параметри 1...3); фактори дорожнього руху (параметри 4...8); фактори критичної інфраструктури (параметри 9, 10):

1. Тип забудови в районі потенційного автомобільного тунелю (житлова забудова; адміністративна або комерційна забудова; архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти; парки, зони відпочинку; промислова забудова; незабудовані території).

2. «Фактор середмістя» – відношення автомобільного тунелю до транспортної системи міста (ділянка розташована в зоні середмістя; ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті; ділянка поза середмістям загальноміського значення; ділянка поза середмістям місцевого значення).

3. Щільність населення в зоні потенційного автомобільного тунелю (до 150 осіб/га; 150...200 осіб/га; 200...300 осіб/га; більше 300 осіб/га).

4. Добовий маятниковий рух працівників за маршрутом потенційного автомобільного тунелю (низький; середній; високий).

5. Щільність вулично-дорожньої мережі в районі потенційного автомобільного тунелю (0,5...1 км/км²; 1...1,5 км/км²; 1,5...2,2 км/км²; 2,2...3 км/км²).

6. Середня швидкість автомобільного руху у години «пік» (до 20 км/год; 20...40 км/год; більше 40 км/год).

7. Наземна зв'язаність кінців автомобільного тунелю магістралями (незадовільна – немає прямих шляхів, довгі об'їзди з суттєвими перешкодами; частково задовільна – один прямий шлях з певними перешкодами; задовільна – один магістральний шлях, або декілька альтернативних шляхів із певними перешкодами; добра – більше одного магістрального шляху).

8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного автомобільного тунелю (погана – вузькі магістралі, велика кількість перетинів, особливо нерегульованих, припарковані автомобілі; середня – магістралі середньої ширини, декілька перетинів, переважно регульованих; висока – широкі магістралі, мало перетинів, перетини регульовані).

9. Ступінь критичності об'єкту інженерно-транспортної інфраструктури (об'єкт критичної

інфраструктури, функції якого можуть бути передані іншим об'єктам лише з великими втратами; об'єкт критичної інфраструктури, функції якого можуть бути передані іншим об'єктам з помірними втратами; об'єкт транспортної інфраструктури, що не належить до критичної).

10. Стан вразливості інженерно-транспортної інфраструктури (високий; середній; низький).

У вигляді морфологічної таблиці ці параметри представлені в табл. 1.

На другому етапі була побудована морфологічна таблиця, яка містить параметри, необхідні для підтримки прийняття рішень щодо доцільності і пріоритетності побудови автомобільного тунелю. Ефект від побудови автомобільного тунелю є комплексним, і може вплинути в різній мірі на ряд факторів ризику, серед яких можна виділити шість основних:

P1. Забруднення повітря (викиди шкідливих вихлопних газів).

P2. Шум і динамічні впливи (гул двигунів, лягання трамваїв, вібрації та ін.).

P3. Дорожні затори (зменшення середньої швидкості руху, порушення функції транспорту, підвищені викиди шкідливих газів).

P4. Дорожні аварії (надмірні затримки, травмування людей).

P5. Протяжність маршруту сполучення.

P6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів.

Таким чином, до морфологічної таблиці другого етапу увійшло вісім параметрів:

А. Доцільність побудови автомобільного тунелю (доцільний; недоцільний).

В. Вагомість факторів ризику на ділянці (забруднення повітря; шум і динамічні впливи; дорожні затори; дорожньо-транспортні пригоди; протяжність маршруту сполучення; вразливість внаслідок воєнних атак або терактів).

Решта параметрів С...Н мають однакову структуру, описуючи вплив автомобільного тунелю на кожний із факторів ризику P1...P6, з чотирма альтернативами: не впливає; частково мінімізує; помірно мінімізує; суттєво мінімізує.

Загальний вигляд морфологічної таблиці другого етапу показано в табл. 2.

Таблиця 1

Характеристики ділянки потенційного тунелю

Table 1

Characteristics of the potential tunnel site

1. Тип забудови	2. Фактор середмістя	3. Щільність населення	4. Маятниковий рух працівників	5. Щільність вулично-дорожньої мережі
1.1. Житлова забудова	2.1. Ділянка розташована в зоні середмістя	3.1. До 50 осіб/га	4.1. Низький	5.1. 0,5...1 км/км ²
1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова	2.2. Ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті	3.2. 50...100 осіб/га	4.2. Середній	5.2. 1...1,5 км/км ²
1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	2.3. Ділянка поза середмістям загальноміського значення	3.3. 100...200 осіб/га	4.3. Високий	5.3. 1,5...2 км/км ²
1.4. Парки, зони відпочинку	2.4. Ділянка поза середмістям місцевого значення	3.4. Більше 200 осіб/га		5.4. 2...2,5 км/км ²
1.5. Промислова забудова				
1.6. Незабудовані території				
6. Середня швидкість автомобільного руху у години «пік»	7. Наземна зв'язаність кінців автомобільного тунелю автошляхами	8. Пропускна здатність наземних шляхів	9. Ступінь критичності об'єкту інженерно-транспортної інфраструктури	10. Стан вразливості інженерно-транспортної інфраструктури
6.1. до 20 км/год	7.1. Незадовільна	8.1. Погана	9.1. Незамінний об'єкт критичної інфраструктури	10.1. Високий
6.2. 20...40 км/год	7.2. Частково задовільна	8.2. Середня	9.2. Частково замінний об'єкт критичної інфраструктури	10.2. Середній
6.3. понад 40 км/год	7.3. Задовільна	8.3. Висока	9.3. Об'єкт транспортної інфраструктури, що не належить до критичної	10.3. Низький
	7.4. Добра			

Параметри рішення щодо доцільності і пріоритетності побудови автомобільного тунелю

Table 2

Decision parameters regarding the feasibility and priority of building a car tunnel

А. Доцільність автомобільного тунелю	В. Вагомість факторів ризику на ділянці	С. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Забруднення повітря»	Д. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»
А.1. Доцільний	В.1. Забруднення повітря	С.1. Не впливає	Д.1. Не впливає
А.2. Недоцільний	В.2. Шум і динамічні впливи	С.2. Частково мінімізує	Д.2. Частково мінімізує
	В.3. Дорожні затори	С.3. Помірно мінімізує	Д.3. Помірно мінімізує
	В.4. Дорожньо-транспортні пригоди	С.4. Суттєво мінімізує	Д.4. Суттєво мінімізує
	В.5. Протяжність маршруту сполучення		
	В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів		
Е. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Дорожні затори»	Ф. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Дорожньо-транспортні пригоди»	Г. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Протяжність маршруту сполучення»	Н. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»
Е.1. Не впливає	Ф.1. Не впливає	Г.1. Не впливає	Н.1. Не впливає
Е.2. Частково мінімізує	Ф.2. Частково мінімізує	Г.2. Частково мінімізує	Н.2. Частково мінімізує
Е.3. Помірно мінімізує	Ф.3. Помірно мінімізує	Г.3. Помірно мінімізує	Н.3. Помірно мінімізує
Е.4. Суттєво мінімізує	Ф.4. Суттєво мінімізує	Г.4. Суттєво мінімізує	Н.4. Суттєво мінімізує

Результати

Результати морфологічного аналізу системи автомобільних тунелів. Для побудованої системи морфологічних таблиць була проведена розрахункова процедура МММА. Вхідні оцінки в методі визначались на основі Генерального плану м. Києва, транспортної схеми, інструментів Google Maps, геопросторових та інших допоміжних джерел даних. В результаті були отримані оцінки, наведені в табл. 3.

Агрегуючий параметр «А. Доцільність будівництва» дозволяє зробити висновки щодо загальних пріоритетів будівництва автомобільних

тунелів. Як видно з табл. 3, будівництво всіх автомобільних тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва, є скоріше доцільним, ніж недоцільним, при цьому найбільшу оцінку сприятливості мають тунелі 3, 4, 5, що з'єднують правий і лівий береги Дніпра. Це пояснюється їх здатністю протидіяти фактору ризику, пов'язаному із військовими загрозами, який робить суттєвий внесок в агреговану оцінку.

Для визначення найбільш пріоритетних (рейтингових) автомобільних тунелів з точки зору кліматичної нейтральності необхідно розглянути здатність потенційного автомобільного тунелю мінімізувати фактори ризику «Р1. За-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

бруднення повітря», «Р3. Дорожні затори» (сповільнена швидкість і підвищений час простою автомобілів призводять до збільшення кількості викидів вихлопних газів), «Р5. Протяж-

ність маршруту сполучення» (довший час руху також пропорційно збільшує викиди).

Порівняння автомобільних тунелів за впливом на ці фактори ризику показане на рис. 2–4.

Таблиця 3

Впливи тунелів 1...8 на фактори ризику

Table 3

Impacts of tunnels 1...8 on risk factors

Параметр	Альтернатива	Тунель							
		1	2	3	4	5	6	7	8
А. Доцільність будівництва	А.1. Доцільний	0,750	0,977	0,993	0,997	0,998	0,976	0,886	0,973
	А.2. Недоцільний	0,250	0,023	0,007	0,003	0,002	0,024	0,114	0,027
	В.1. Забруднення повітря	0,152	0,062	0,031	0,020	0,051	0,044	0,150	0,081
	В.2. Шум і динамічні впливи	0,110	0,032	0,018	0,008	0,029	0,020	0,093	0,054
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.3. Дорожні затори	0,274	0,379	0,276	0,315	0,331	0,439	0,352	0,331
	В.4. Дорожньо-транспортні пригоди	0,141	0,036	0,049	0,049	0,029	0,037	0,081	0,050
	В.5. Протяжність маршруту сполучення	0,184	0,331	0,294	0,317	0,324	0,300	0,190	0,303
	В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	0,139	0,160	0,332	0,291	0,236	0,161	0,133	0,182
С. Вплив на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає	0,013	0,003	0,019	0,021	0,000	0,007	0,001	0,002
	С.2. Частково мінімізує	0,266	0,230	0,274	0,298	0,104	0,296	0,139	0,191
	С.3. Помірно мінімізує	0,463	0,577	0,599	0,631	0,543	0,570	0,457	0,525
	С.4. Суттєво мінімізує	0,259	0,189	0,108	0,050	0,353	0,127	0,404	0,282
Д. Вплив на фактор «Шум і динамічні впливи»	Д.1. Не впливає	0,043	0,027	0,097	0,100	0,011	0,044	0,014	0,018
	Д.2. Частково мінімізує	0,318	0,476	0,502	0,625	0,325	0,546	0,265	0,333
	Д.3. Помірно мінімізує	0,354	0,310	0,270	0,215	0,377	0,273	0,368	0,368
	Д.4. Суттєво мінімізує	0,286	0,187	0,130	0,061	0,287	0,136	0,353	0,281
Е. Вплив на фактор «Дорожні затори»	Е.1. Не впливає	0,076	0,002	0,005	0,001	0,000	0,003	0,013	0,002
	Е.2. Частково мінімізує	0,390	0,081	0,138	0,086	0,060	0,097	0,283	0,131
	Е.3. Помірно мінімізує	0,308	0,326	0,357	0,362	0,276	0,382	0,334	0,337
	Е.4. Суттєво мінімізує	0,225	0,591	0,499	0,552	0,663	0,519	0,370	0,530

Продовження таблиці 3

Continuation of Table 3

Параметр	Альтернатива	Тунель							
		1	2	3	4	5	6	7	8
F. Вплив на фактор «Дорожньо-транспортні пригоди»	F.1. Не впливає	0,232	0,074	0,337	0,616	0,015	0,316	0,030	0,048
	F.2. Частково мінімізує	0,367	0,472	0,372	0,238	0,438	0,375	0,395	0,457
	F.3. Помірно мінімізує	0,239	0,299	0,200	0,105	0,329	0,208	0,308	0,308
	F.4. Суттєво мінімізує	0,162	0,155	0,092	0,041	0,218	0,102	0,267	0,187
G. Вплив на протяжність маршруту сполучення	G.1. Не впливає	0,128	0,020	0,002	0,001	0,010	0,014	0,125	0,021
	G.2. Частково мінімізує	0,266	0,101	0,075	0,059	0,077	0,096	0,252	0,098
	G.3. Помірно мінімізує	0,343	0,345	0,357	0,345	0,358	0,335	0,355	0,367
	G.4. Суттєво мінімізує	0,263	0,534	0,567	0,595	0,555	0,556	0,268	0,515
H. Вплив на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терорактів»	H.1. Не впливає	0,052	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,020	0,006
	H.2. Частково мінімізує	0,278	0,102	0,025	0,021	0,019	0,093	0,215	0,112
	H.3. Помірно мінімізує	0,234	0,219	0,209	0,204	0,193	0,225	0,234	0,214
	H.4. Суттєво мінімізує	0,436	0,673	0,766	0,775	0,788	0,675	0,530	0,668

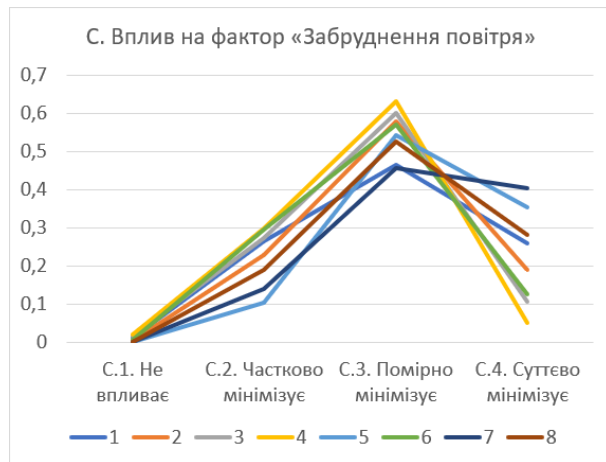


Рис. 2. Вплив автомобільних тунелів 1...8 на фактор ризику «P1. Забруднення повітря»

Fig. 2. Impact of car tunnels 1...8 on the risk factor «P1. Air pollution»

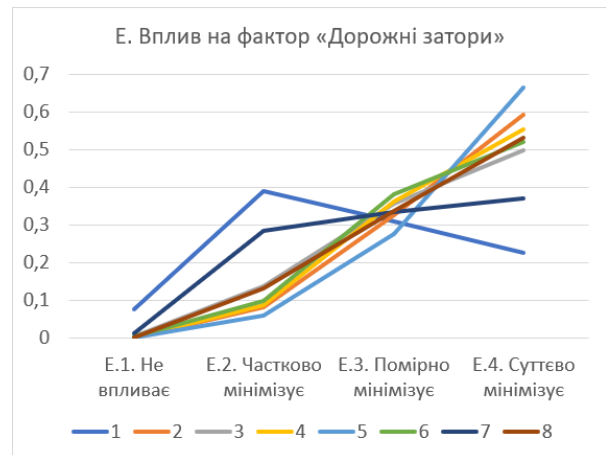


Рис. 3. Вплив автомобільних тунелів 1...8 на фактор ризику «P3. Дорожні затори»

Fig. 3. Impact of car tunnels 1...8 on the risk factor «P3. Traffic jams»

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

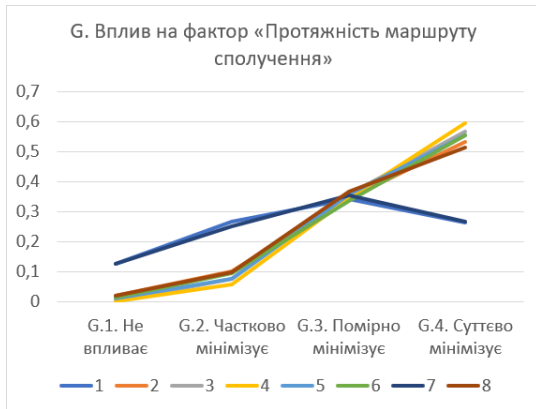


Рис. 4. Вплив автомобільних тунелів 1...8 на фактор ризику «P5. Протяжність маршруту сполучення»

Fig. 4. Impact of car tunnels 1...8 on the risk factor «P5. Length of the connection route»

Для більшої наочності порівняння впливу будівництва потенційних автомобільних тунелів на різні фактори ризику введемо коефіцієнт $w_{ratio} = (w_{medium} + w_{high}) / (w_{low} + w_{none})$, який відображає відношення суми оцінок альтернатив помірного w_{medium} і суттєвого w_{high} впливу будівництва автомобільного тунелю на мінімізацію відповідного фактору ризику, до суми ваг альтернатив часткового w_{low} і відсутнього w_{none} впливу будівництва автомобільного тунелю на мінімізацію того ж фактору ризику. Більші значення цього коефіцієнта свідчать про більш значний вплив потенційного будівництва автомобільного тунелю на відповідний фактор ризику. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для всіх восьми автомобільних тунелів наведені у вигляді діаграми на рис. 5.

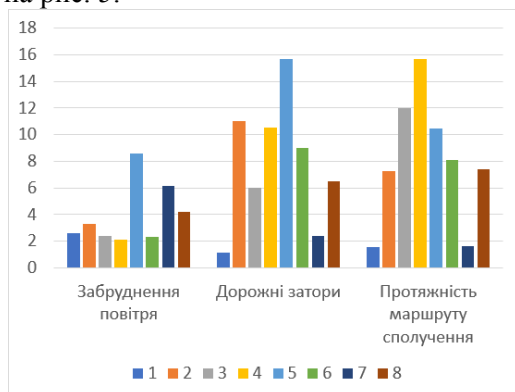


Рис. 5. Порівняння автомобільних тунелів 1...8 за зведеним показником впливу на фактори ризику

Fig. 5. Comparison of car tunnels 1...8 by the combined indicator of impact on risk factors

Як бачимо з рис. 2...5, автомобільний тунель 5 має значний вплив на фактори ризику, пов'язані з кліматичною нейтральністю. Цей автомобільний тунель має найвищий рейтинг зі значною перевагою за факторами забруднення повітря і дорожніх заторів, і знаходиться в трійці найважливіших тунелів за аспектом протяжності маршруту сполучення. На другій позиції за впливом на забруднення повітря знаходиться автомобільний тунель 7, який також має високе значення альтернативи суттєвого впливу на екологічний (кліматичний) аспект (рис. 1), однак за впливом на два інші розглянуті показники ризику цей автомобільний тунель має більш скромні показники, оскільки він фактично дублює існуючу транспортну артерію з високою пропускнуою здатністю. Таким чином, автомобільний тунель 5 може бути рекомендований для першочергового будівництва і доцільно дослідити його вплив на функціонування транспортної системи м. Києва та загального зменшення автомобільних викидів.

Результати оцінки впливів автомобільного тунелю з використанням прогнозної транспортної моделі м. Києва. Тестування пріоритетного автомобільного тунелю 5 проведене із використанням прогнозної транспортної моделі м. Києва та його приміської зони, розроблений в Навчальній науково-дослідній лабораторії просторового планування територій та моделювання транспортних потоків кафедри міського будівництва Київського національного університету будівництва та архітектури, яка, подібно до морфологічної моделі, є математичним інструментом для кількісної та якісної оцінки наслідків прийняття управлінських рішень при транспортному плануванні територій [4]. Транспортну модель можна представити у вигляді двох складових – моделі транспортної пропозиції (складається з елементів транспортної системи міста: вулично-дорожня мережа, маршрути громадського транспорту різних типів, зупинки тощо) та моделі транспортного попиту (характеризує цілі вибору режимів і маршрутів переміщення, параметри мобільності населення тощо).

Структура характеристик, які використовуються у транспортній моделі:

1. Просторово-планувальні характеристики: параметри морфологічної структури міста, зок-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

рема функціональне зонування території, конфігурація вулично-дорожньої мережі та класифікація вулиць; особливу увагу приділяють наявності транспортно-пересадкових вузлів і розподілу зон тяжіння поїздок у межах міста.

2. Елементи інженерно-транспортної інфраструктури: охоплюють технічні та експлуатаційні параметри мережі громадського транспорту (типи рухомого складу, маршрути, інтервали, швидкість руху тощо), індивідуального транспорту (інтенсивність, середня швидкість, обмеження руху тощо).

3. Соціально-економічні параметри: включають просторовий розподіл населення, щільність та структуру домогосподарств, рівень автомобілізації, розміщення місць прикладання праці, наявність навчальних та комерційних установ, які виступають як джерела або поглиначі транспортного попиту.

4. Поведінкові характеристики: транспортна модель враховує мотивацію поїздок (робочі, освітні, соціальні, побутові цілі), часові параметри (тривалість поїздок, затримки в русі), логіку вибору виду транспорту (з урахуванням затрат), а також маршрутні переваги користувачів.

У результаті транспортного моделювання можна отримати навантаження на різні елементи вулично-дорожньої мережі, матриці кореспонденцій для різних режимів переміщень, екологічну (кліматичну) оцінку досліджуваних територій, техніко-економічні обґрунтування розвитку інженерно-транспортної інфраструктури.

Для оцінки впливу автомобільного тунелю 5 розглядали два сценарії: сценарій 1 (базовий) – існуюча прогнозна транспортна модель міста Києва та його приміської зони [5], як основа для подальшого порівняння розрахункових сценаріїв; сценарій 2 – впровадження в існуючу модель автомобільного тунелю від Галицької площі до Броварського проспекту в районі ст. м Лівобережна з шириною проїзної частини у дві смуги руху в кожному напрямку (рис. 6).

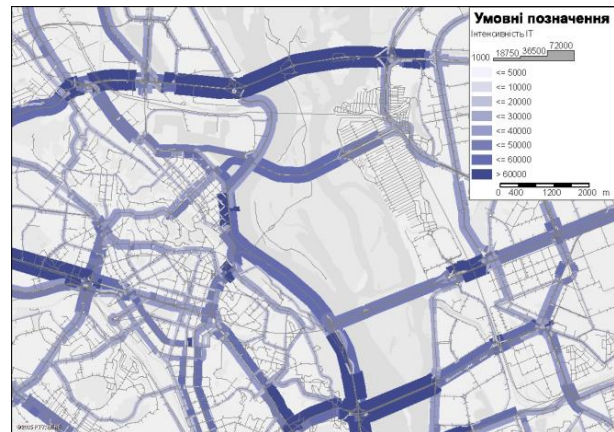
Картограми транспортного моделювання відображені на рис. 7 та 8.

У результаті проведених розрахунків отримані показники якості функціонування вулично-дорожньої мережі по м. Києву за двома сценаріями (табл. 4).



Рис. 6. Трасування проектного автомобільного тунелю 5 у розрахунковому сценарію 2
Fig. 6. Route of the design car tunnel 5 in calculation scenario 2

a – a



b – b

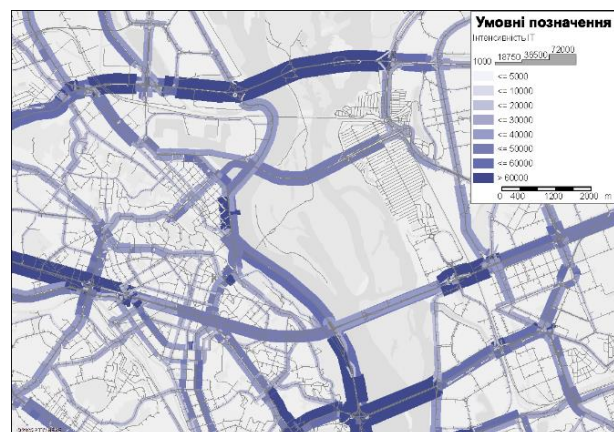


Рис. 7. Картограми інтенсивності руху транспорту:
a – сценарій 1; *b* – сценарій 2

Fig. 7. Traffic intensity maps:
a – scenario 1; *b* – scenario 2

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

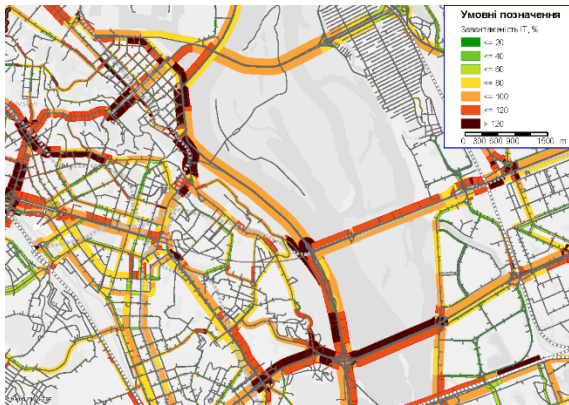
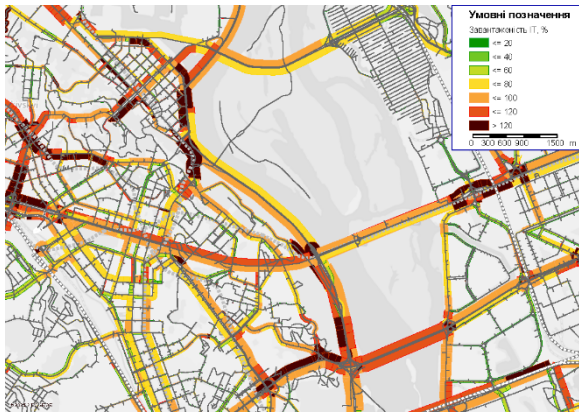
a – a*б – b*

Рис. 8. Картограми завантаженості вулично-дорожньої мережі:

a – сценарій 1; *б* – сценарій 2

Fig. 8. Traffic maps of the street and road network:

a – scenario 1; *b* – scenario 2

Таблиця 4

**Кількісні результати моделювання
(за 1 середньодобовий період по Києву в цілому)**

Table 4

**Quantitative modeling results
(for 1 average daily period for Kyiv as a whole)**

Назва сценарію	Загальний пробіг індивідуального транспорту, км	Загальний час реалізації кореспонденцій, год
Сценарій 1	35 379 458	2 712 178
Сценарій 2	35 229 968	2 612 965
	–149 490 (–0,42 %)	– 99 213 (–3,6 %)

Аналіз отриманих результатів свідчить, що спорудження й включення в транспортну мережу автомобільного тунелю 5 зменшить загальний пробіг індивідуального транспорту (автомобілів) в м. Києві на 149,5 тис. км на добу, при цьому загальний час реалізації кореспонденцій зменшиться на 3,6 % (майже на 100 тис. год.).

На 2020...2024 роки цільовий показник викидів автомобільного транспорту в країнах ЄС склав 115,1 г CO₂/км (за стандартом WLTP) [7]. В Україні, де переважають автомобілі більшого строку експлуатації, ніж у країнах ЄС, середній показник викидів може знаходитись у межах 130...140 г CO₂/км. Виходячи з цього можна констатувати, що введення в експлуатацію розглянутого автомобільного тунелю 5 скоротить викиди CO₂ за добу на 19,4...20,9 тонн тільки за фактором скорочення загального пробігу автомобілів. Ще більше значення має вплив автомобільного тунелю на зменшення викидів завдяки скороченню загального часу реалізації транспортних кореспонденцій (поїздок) на 99,2 тис. годин, оскільки ефект збільшення швидкості руху, пропорційним чином скорочує викиди. Таким чином загальний очікуваний ефект скорочення викидів CO₂ може скласти понад 4 % від викидів усього автомобільного руху містом Києвом (до 179 т/доба), а мультиплікативний ефект буде ще більшим.

Варто зауважити, що прогнозна транспортна модель м. Києва та його приміської зони, яка використовувалась в цій роботі, наразі не враховує фактор спровокованого (індукованого) попиту, коли кращі умови для руху автомобілів викликають збільшення попиту на поїздки автомобілями за рахунок інших режимів мобільності.

Наукова новизна та практична значимість

Структурування складних міських проблем і прийняття планувальних рішень в умовах багатокритеріальних задач здійснене шляхом модифікованого методу морфологічного аналізу, який розглядається як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. Кліматичні ризики, введені в аналіз системи автомобільних тунелів, дозволили більш комплексно і об'єктивно оцінити пріоритетність

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

розвитку підземної інфраструктури. Вперше з використанням прогнозної транспортної моделі м. Києва поставлена дослідна задача й отримані кількісні показники зміни трафіку від включення автомобільного тунелю в транспортну мережу міста, зокрема – вплив визначеної траси тунелю на зменшення емісії CO₂.

Розроблена комплексна модель та методика сценарного аналізу забезпечують міське самоврядування, державні органи влади, зацікавлені громадські організації та інвесторів ефективними можливостями для прийняття планувальних рішень, виходячи із системних позицій і суспільної ваги факторів ризику.

Висновки

Широке освоєння міського підземного простору крім вирішення транспортних, територіальних, гідротехнічних, енергетичних і безпечних проблем великого міста може розглядатися як ефективний інструмент сприяння кліматичній нейтральності (зменшенню викидів парникових газів). При цьому задачі покращення міського трафіку корелюють із задачами мінімізації викидів CO₂.

Використання комплексної моделі модифікованого методу морфологічного аналізу для оцінки системи автомобільних тунелів дало можливість оцінити пріоритетність (першочерговість) будівництва автомобільних тунелів, які розглядалися при розробці Генерального плану м. Києва [15], з урахуванням кліматичних (екологічних) ризиків. Найбільший рейтинг отримав тунель 5 (від Галицької площі до початку Броварського проспекту).

Оцінка впливу даного автомобільного тунелю на міський трафік проводилась з використанням прогнозної транспортної моделі м. Киє-

ва – перевіреного експертного інструменту для підтримки прийняття рішень в області управління транспортною інфраструктурою. Результати транспортного моделювання показують, що введення в експлуатацію зазначеного автомобільного тунелю зменшують за добу загальний пробіг індивідуального транспорту в межах міста на 149,5 тис. км, а загальний час реалізації транспортних кореспонденцій – на 99,2 тис. годин, що сумарно зменшує викиди всього автомобільного руху містом приблизно на 4%. Хоча проведене рейтингування восьми автомобільних тунелів свідчить про дещо менший вплив інших трас на трафік і викиди CO₂, цей вплив усе ж таки залишається вагомим. Можна припустити, що розглянута в Генеральному плані система з восьми автомобільних тунелів у разі введення в експлуатацію тільки за рахунок вдосконалення міського трафіку могла б зменшити обсяги викидів CO₂ на 18...20 %, а з урахуванням можливої відведення та утилізації автомобільних викидів у автомобільних тунелях – на 25...27 %, без врахування фактору спровокованого попиту. Таким чином, у роботі на прикладі м. Києва вперше доведений високий вплив автомобільних тунелів на зменшення викидів парникових газів, що дає підстави розглядати підземну транспортну інфраструктуру як вагому складову кліматичної нейтральності великих міст.

Грантова підтримка

Дослідження виконане в рамках рамкової програми Horizon Europe, проєкт «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)», грантова угода: 101148374, і профінансоване Європейським Союзом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гайко Г. І., Булгаков В. П., Сіверин М. О. Система автомобільних тунелів як спосіб розв'язання транспортних і екологічних проблем мегаполісу. *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*. 2016. № 30. С. 196–206.
2. Гетун Г., Безклубенко І., Соломін А., Баліна О. Особливості об'ємно-планувальних рішень захисних споруд цивільного захисту. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2023. № 67. С. 203–220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220>
3. Клименко М. О., Пилипенко Ю. В., Мороз О. С. *Екологія міських систем*. Київ : ВД «Кондор», 2024. 294 с.

4. Осетрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І. Основні принципи створення транспортної моделі міста. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. № 57. С. 309–320.
URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7449>
5. Bespalov D., Tarasiuk V., Osetrin M., Dorosh M., Prymachenko O. An analysis of the transport impact of finish building on-ramps and off-ramps from the Dnipro embankment to the Darnytskyi Bridge in Kyiv. *Architectural Studies*. 2024. Vol. 10. Iss. 2. P. 172–190. DOI: <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.172>
6. Duczynski G. Investigating traffic congestion: Targeting technological and social interdependencies through general morphological analysis. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 126. P. 161–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.019>
7. CO₂ emissions performance of new passenger cars in Europe. *European Environment Agency*. 2024.
URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger>
8. Genger T. K., Luo Y., Hammad A. Multi-criteria spatial analysis for location selection of multi-purpose utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 115. 104073.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104073>
9. Glazebrook G., Newman P. The City of the Future. *Urban Planning*. 2018. Vol 3. № 2. P. 1–20.
DOI: <https://doi.org/10.17645/up.v3i2.1247>
10. Hickman R., Banister D. *Transport, Climate Change and the City*. London : Taylor Francis Group, 2024. 400 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203074435>
11. Mortati M., Cartron E. Strategizing for Climate Neutrality. How to Make Social Innovation Relevant in the City’s Journey to Climate Neutrality. *Social Innovation Projects for Climate Neutral Cities* : SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology / ed. by S. Bresciani. Cham : Springer. 2025. P. 25–52.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87726-1_3
12. Pankratova N., Haiko H., Savchenko I. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Cham : Springer, 2024. 256 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
13. Raoofi Z., Stenemo E., Engholm A., Pernestål A. How can we structure the future development of automation, electrification, and digitalization in the transportation sector by using morphological analysis? *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 1808–1815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.657>
14. Śmieszek M., Kostian N., Mateichyk V., Mościszewski J., Tarandushka L. Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 24. 8538.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248538>
15. Vodianyі A. Проект Генплану Києва. *Slideshare*. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/ss-230454864/230454864>

Н. І. ГАЙКО^{1*}, І. О. САВЧЕНКО², В. П. ТАРАСЮК³, Д. О. БЕСПАЛОВ⁴

^{1*}Dep. of Geoenvironment Chair, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteysky Av., 37, Block 22, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (050) 921 94 59, e-mail gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0001-7471-3431

²Dep. of Mathematical Methods for System Analysis Chair, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteysky Av., 37, Block 22, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (050) 387 16 88, e-mail savil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³Dep. of Urban Planning, Kyiv National University of Construction and Architecture, Air Force Av., 31, Kyiv, Ukraine, 03037, tel. +38 (097) 396 93 24, e-mail tarasyuk90@gmail.com, ORCID 0000-0003-4762-5668

⁴Dep. of Urban Planning, Kyiv National University of Construction and Architecture, Air Force Av., 31, Kyiv, Ukraine, 03037, tel. +38 (067) 943 51 19, e-mail dmitry.bespalov@me.com, ORCID 0000-0002-0778-5627

Car Tunnels as a Climate Neutrality Factor for a Large City

Purpose. Determining the development priorities for a network of car tunnels envisioned in the Kyiv city General Plan, considering the city’s climate neutrality problem; systemic evaluation of a car tunnel’s impact on the city’s functioning, traffic change, and ecological (climate) indicators. **Methodology.** Modified morphological analysis method for urbanized territories, considering the groups of structural and functional, and ecological (climate) factors and risks, including: air pollution (car exhaust fumes), route length, traffic jams, dynamic noise etc. The transport model for Kyiv was introduced as a combination of two components – the transport supply model (consisting of the city’s traffic system elements: road network, different public transport routes, stations etc.), and the

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

transport demand model (which characterizes the purposes for the choice of modes and routes for movement, population mobility parameters etc.). The synthesis of these methodologies is considered by the authors as an important process of converting scientific methods into management decisions. **Findings.** A systemic decision support model was developed for evaluating priorities, and ranking (advisable queueing) of tunnel construction in Kyiv considering the climate neutrality factor; a comparative assessment was made, and the highest-ranking tunnel was determined (the track from Galyska square to the start of the Brovarskyi avenue). Testing the scenario that incorporates said tunnel into the transport model of Kyiv allowed to assess the overall expected traffic change, and demonstrated the capacity to reduce overall CO₂ exhaust by 4 % of the total city's emission. **Originality.** The novel construction of a morphological model for evaluating a system of car tunnels considering their impact on key risk factors that allowed to assess alternative configurations (scenarios) taking into account different priorities (weights) of a certain risk, particularly those impacting CO₂ emission; a quantitative correlation was revealed between the tunnel's track, its impact on the city traffic, and reduction of CO₂ exhaust. **Practical value.** The paper demonstrates the high impact of car tunnels on the reduction of greenhouse gas emission (as well as mitigating a number of transport, territorial and safety issues) on the example of Kyiv city, providing the basis of considering the development of the underground traffic infrastructure as a constituent of achieving climate neutrality and sustainable development in big cities. **Grant support.** The research was conducted within the Horizon Europe frame program, project «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)», grant agreement 101148374, and financed by the European Union.

Keywords: city planning; underground construction; climate neutrality; CO₂ emission; car tunnels; city traffic; system analysis; transport model

REFERENCES

1. Haiko, H. I., Bulhakov, V. P., & Siveryn, M. O. (2016). Systema avtomobilnykh tuneliv iak sposib rozviazannia transportnykh i ekolohichnykh problem mehapolisu. *Visnyk NTUU «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya «Hirnyctvo»*, 30, 196-206. (in Ukrainian)
2. Getun, G., Bezklubenko, I., Solomin, A., & Balina, O. (2023). Features of volume-planning decisions of civil defense protective structures. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*, 67, 203-220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220> (in Ukrainian)
3. Klymenko, M. O., Pylypenko, Yu. V., & Moroz, O. S. (2024). *Ekolohiia miskykh system*. Kyiv: VD «Kondor». (in Ukrainian)
4. Osetrin, M. M., Bespalov, D. O., & Dorosh, M. I. (2015). Osnovni pryntsypy stvorennia transportnoii modeli mista. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 57, 309-320. Retrieved from: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7449> (in Ukrainian)
5. Bespalov, D., Tarasiuk, V., Osetrin, M., Dorosh, M., & Prymachenko, O. (2024). An analysis of the transport impact of finish building on-ramps and off-ramps from the Dnipro embankment to the Darnytskyi Bridge in Kyiv. *Architectural Studies*, 10(2), 172-190. DOI: <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.172> (in English)
6. Duczynski, G. (2018). Investigating traffic congestion: Targeting technological and social interdependencies through general morphological analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 126, 161-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.019> (in English)
7. CO₂ emissions performance of new passenger cars in Europe. (2024). *European Environment Agency*. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger> (in English)
8. Genger T. K., Luo Y., & Hammad, A. (2021). Multi-criteria spatial analysis for location selection of multi-purpose utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, 104073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104073> (in English)
9. Glazebrook, G., & Newman, P. (2018). The City of the Future. *Urban Planning*, 3(2), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.17645/up.v3i2.1247> (in English)
10. Hickman, R., & Banister, D. (2024). *Transport, Climate Change and the City*. London: Taylor Francis Group. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203074435> (in English)
11. Mortati, M., & Cartron, E. (2025). Strategizing for Climate Neutrality. How to Make Social Innovation Relevant in the City's Journey to Climate Neutrality. *Social Innovation Projects for Climate Neutral Cities* : SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87726-1_3 (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

12. Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024). *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1> (in English)
13. Raoofi, Z., Stenemo, E., Engholm, A., & Pernestål, A. (2023). How can we structure the future development of automation, electrification, and digitalization in the transportation sector by using morphological analysis? *Transportation Research Procedia*, 72, 1808-1815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.657> (in English)
14. Śmieszek, M., Kostian, N., Mateichyk, V., Mościszewski, J., & Tarandushka, L. (2021). Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*, 14(24), 8538. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248538> (in English)
15. Vodiani, A. (2020). *Heneralnyi plan mista Kyieva. Slideshare*. Kyiv. Retrieved from: <https://www.slideshare.net/andrewvodiani/ss-230454864> (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії: 15.07.2025

Прийнята до друку: 18.12.2025

УДК 69.059.7

Т. С. КРАВЧУНОВСЬКА^{1*}, К. В. БАЛАКІН²

^{1*}Каф. організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (067) 635 36 08, ел. пошта t.s.kravchunovska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0986-8995

²Каф. організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (099) 796 64 12, ел. пошта alakinkonst@gmail.com, ORCID 0009-0007-8329-3505

Обґрунтування оптимальної послідовності реконструкції промислових будівель у проєктах ревіталізації з урахуванням їх майбутньої функції

Мета. Вдосконалення методичного підходу до організації процесу ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури з урахуванням їх майбутньої функції (функцій) в умовах часових і ресурсних обмежень. **Методика.** Системний підхід до моделювання процесу організації ревіталізації в частині обґрунтування послідовності включення нефункціонуючих об'єктів транспортної інфраструктури до проєкту; комплексний підхід до формування множини визначальних факторів впливу екзогенного та ендогенного характеру. **Результати.** Вдосконалено методичний підхід до організації процесу ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури з урахуванням збереження автентичності будівель, адаптивного використання їх простору, застосування технологій будівельного інформаційного моделювання, штучного інтелекту, інтернету речей, вибіркового демонтажу конструкцій, ремедіації ґрунтів для дотримання вимог щодо безпеки, комфорту, інклюзивності та енергоефективності, що забезпечує введення в експлуатацію об'єктів із заданими техніко-економічними характеристиками в межах наявних ресурсних обмежень. **Наукова новизна.** Застосовано системний підхід до організації процесів ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури, що передбачає поетапний аналіз послідовності перетворення будівель і споруд із урахуванням визначальних чинників впливу на вибір їх майбутньої функції; при цьому задачі перетворення міської забудови через переосмислення функцій вже існуючих будівель замість будівництва нових об'єктів корелюють із задачами щодо створення сталого житла, економічного зростання, відповідального виробництва і споживання. **Практична значимість.** Задача перетворення міської забудови через переосмислення функцій вже існуючих промислових будівель замість будівництва нових об'єктів корелює із задачами щодо створення сталого житла, економічного зростання, відповідального виробництва і споживання. Запропонований підхід до визначення оптимальної послідовності реконструкції невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення у проєктах ревіталізації дозволяє визначити пріоритетність із урахуванням впливу множини визначальних факторів і забезпечує органи державної влади, органи місцевого самоврядування та інвесторів інструментарієм для прийняття ефективних рішень в умовах часових і ресурсних обмежень, із урахуванням технічних, юридичних та фінансових аспектів.

Ключові слова: ревіталізація; реконструкція; комплексний підхід; визначальні фактори; критерії; оптимальна послідовність реконструкції об'єктів; сталий розвиток

Вступ

На сьогодні у багатьох містах є покинуті промислові будівлі, зокрема об'єкти транспортної інфраструктури, такі як автовокзали, залізничні станції, річкові порти, трамвайні і тролейбусні депо тощо. Такі об'єкти зазвичай мають вигідне місце розташування, характерний, добре упізнаваний зовнішній вигляд, що робить їх перспективними з точки зору перетворення на об'єкти цивільного призначення.

Ревіталізація невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення є важливим завданням для забезпечення сталого розвитку міст, яке дозволяє комплексно вирішувати містобудівні, економічні, екологічні і соціальні проблеми [6, 17].

При обґрунтуванні доцільності реалізації проєктів ревіталізації невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення слід враховувати, що:

– реконструкція будівель зазвичай є дешевшою за нове будівництво, і за умови, що об'єкти

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

перебувають у задовільному технічному стані, їх знесення видається економічно недоцільним;

– зазвичай такі об'єкти мають розвинену інженерну інфраструктуру, що суттєво здешевлює їх реконструкцію;

– реконструкція покинутих об'єктів із наданням їм нових функцій сприяє підвищенню інвестиційної привабливості району, залученню інвесторів, підприємців та клієнтів, створенню нових робочих місць, і, як наслідок, збільшенню надходжень до місцевих бюджетів за рахунок сплачуваних податків.

Проте ревіталізація невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення має не лише економічні переваги, але й соціальні, зокрема:

– перетворення покинутих міських територій на доступні громадські простори з культурно-розважальними центрами, офісними будівлями, житловими будинками тощо;

– усунення депресивних районів завдяки їх перетворенню на багатофункціональні простори, що покращує загальний вигляд міста і створює відчуття безпеки у його мешканців та гостей;

– збереження при ревіталізації автентичного вигляду будівель, що дозволяє поєднати нові функції об'єкту з його історичним минулим, інтегруючи в сучасне місто.

Також на користь впровадження проєктів ревіталізації об'єктів транспортної інфраструктури свідчать і екологічні вигоди, зокрема:

– забезпечення раціонального використання земельних ресурсів, адже використання для інших функцій вже забудованих земельних ділянок дозволяє уникнути освоєння нових територій, наприклад, на околицях міста, які часто використовуються для сільськогосподарських потреб;

– використання існуючих будівель і споруд колишніх об'єктів транспортної інфраструктури під нові функції дозволяє мінімізувати обсяг будівельних відходів від їх знесення і відповідно шкоду довкіллю.

При реалізації проєктів ревіталізації дотримуються принципів сталого розвитку, зокрема передбачається застосування сучасних енергоощадних технологій, спрямованих на зменшення споживання енергії, зниження витрат та скорочення негативного впливу на довкілля.

До позитивних прикладів ревіталізації невикористовуваних об'єктів транспортної інфра-

структури зі зміною їх функціонального призначення можна віднести:

– ревіталізацію порту та складських приміщень HafenCity у м. Гамбурзі (Німеччина) з перетворенням їх на багатофункціональний міський район із житловими будинками, офісними будівлями, торговельними центрами, культурно-розважальними об'єктами, парковою зоною; при цьому окремі застарілі будівлі, які мали історико-культурне значення, зберегли та інтегрували в нову забудову (рис. 1, а) [2];

– ревіталізацію колишнього річкового порту St. Katharine Docks у м. Лондон (Велика Британія), в результаті якої були створені офісні та житлові будівлі, ресторани, бари та сучасна стоянка для яхт (рис. 1, б) [21];

– ревіталізацію колишнього трамвайного депо De Hallen у м. Амстердам (Нідерланди), збудованого на початку ХХ століття; це депо мало відкриті зали, високі стелі, оригінальні металеві конструкції, що ідеально підходять для великих громадських просторів; цей об'єкт був перетворений на культурний центр, в якому розміщено кінотеатр, бібліотеку, фудкорт, майстерні, магазини та готель; при цьому максимально збережено автентичний вигляд будівлі, включно з трамвайними коліями, які стали елементами дизайну підлоги (рис. 1, в) [16];

– ревіталізацію будівлі колишнього депо першого вузькоколісного електричного трамвая в м. Краків (Польща) з перетворенням на музей муніципального будівництва (рис. 1, г) [10];

– ревіталізацію комплексу будівель і споруд колишнього Дарницького шовкового комбінату в м. Київ із перетворенням на креативний кластер «Арт-завод «Платформа», в якому розташовані коворкінги, мистецький простір, фудкорт, творчі майстерні (рис. 1, д) [7].

Аналіз цих та багатьох інших проєктів ревіталізації нефункціонуючих об'єктів транспортної інфраструктури під цивільні об'єкти [13–15, 18–20] з різноманітними функціями дозволяє зробити висновок, що основним завданнями таких проєктів є:

– збереження історичної спадщини, архітектурних особливостей будівель разом із інтеграцією в сучасний міський ландшафт;

– підвищення ринкової вартості нерухомого майна завдяки перетворенню нефункціонуючих

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

активів на сучасні об'єкти житлового та комерційного призначення;

– покращення якості життя у міських районах завдяки створенню нових «місць тяжіння» населення: житлових комплексів, об'єктів соціально-побутового, культурного та громадського призначення;

– стимулювання економічного розвитку через залучення інвестицій, створення нових робочих місць.

Незважаючи на очевидні переваги, розробники проєктів ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення стикаються з низкою проблем, обумовлених:

– технічним станом будівель, від якого залежатиме необхідний обсяг інвестицій;

– невідповідністю колишніх промислових будівель сучасним вимогам щодо пожежної безпеки, інклюзивності, комфорту та енергоефективності;

– юридичними складнощами отримання дозвільної документації [4, 20].

Проте основні питання, пов'язані з доцільністю та ефективністю реалізації проєктів ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення, пов'язані з обґрунтуванням майбутньої функції (функцій) ревіталізованих об'єктів та визначенням послідовності їх перетворення.

Мета

Метою роботи є вдосконалення методичного підходу до організації процесу ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури з урахуванням їх майбутньої функції (функцій) в умовах часових і ресурсних обмежень.

Методика

Методика дослідження ґрунтується на застосуванні системного підходу до організації процесів ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури. Це передбачає поетапний аналіз послідовності перетворення будівель і споруд із урахуванням визначальних чинників впливу на вибір їх майбутньої функції. Такий підхід забезпечує прийняття раціональних рішень в умовах обмежених ресурсів.

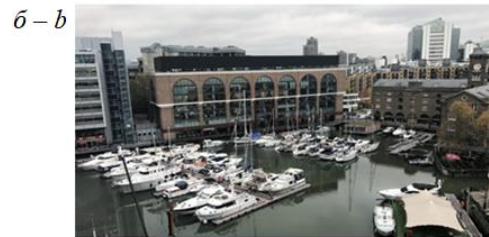


Рис. 1. Ревіталізовані об'єкти транспортної інфраструктури:
a – HafenCity; *б* – St. Katharine Docks; *в* – De Hallen;
г – трамвайне депо; *д* – Арт-завод «Платформа»

Fig. 1. Revitalised transport infrastructure objects:
a – HafenCity; *b* – St. Katharine Docks; *c* – De Hallen;
d – tram depot; *e* – Art factory «Platform»

Результати

Майбутня функція (функції) об'єкта ревіталізації має забезпечувати його найбільш ефективне використання, тобто таке використання, яке є фізично можливим, юридично дозволеним та економічно доцільним, в результаті чого об'єкт досягає найбільшої вартості [3, 9].

Обґрунтування майбутньої функції (функцій) об'єкту ревіталізації потрібно здійснювати з урахуванням комплексного впливу низки визначальних ендегенних та екзогенних факторів.

До ендегенних факторів, які можуть як сприяти, так і обмежувати певні функції, можна віднести такі:

- історична та (або) архітектурна цінність об'єкта ревіталізації;
- архітектурні рішення об'єкта ревіталізації;
- об'ємно-планувальні рішення об'єкта ревіталізації;
- конструктивні рішення об'єкта ревіталізації;
- організаційно-технологічні та технічні рішення об'єкта ревіталізації;
- інженерні комунікації та їх технічний стан;
- технічний стан окремих конструктивних елементів та об'єкта ревіталізації в цілому.

До екзогенних факторів, які можуть як сприяти певним функціям, так і їх обмежувати, можна віднести такі:

- місце розташування об'єкта ревіталізації;
- транспортна доступність (наприклад, близькість до центру міста робить об'єкт привабливим для розміщення житла, готелів, офісних приміщень, торговельно-розважальних центрів; віддалені промислові зони можуть бути привабливими для розміщення складської нерухомості, логістичних центрів);
- характер навколишньої забудови та соціальної інфраструктури;
- ринковий попит;
- правові обмеження (зонінг визначає умови та обмеження використання території для містобудівних потреб у межах визначених зон, а тому можливо буде потрібна процедура зміни цільового призначення).

Для прийняття обґрунтованого рішення щодо визначення майбутньої функції (функцій) об'єкта ревіталізації доцільно застосовувати:

– маркетингові дослідження щодо ринкової кон'юнктури, а також цінової політики на відповідному ринку нерухомості;

– SWOT-аналіз, в межах якого виконується оцінювання сильних і слабких сторін досліджуваного об'єкта, а також можливостей та загроз з боку зовнішнього середовища;

– концептуальне проектування з формулюванням основної ідеї ревіталізації конкретного об'єкту, визначенням цілей і параметрів, а також попередньою оцінкою можливостей реалізації та ефективності.

Ревіталізація невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення передбачає застосування комплексу сучасних технологій та підходів, спрямованих на їхню адаптацію до нових функцій із забезпеченням безпеки, інклюзивності, комфорту та енергоефективності, зокрема:

– обстеження конструктивних елементів будівлі (фундаментів, стін, перекриттів, даху, підлог, віконних і дверних прорізів, внутрішніх сантехнічних та електричних пристроїв) для оцінювання їх технічного стану та визначення зносу, зокрема з застосуванням неруйнівних методів;

– будівельне інформаційне моделювання (BIM-технології) для створення будівельної інформаційної моделі об'єкта ревіталізації (BIM-моделі об'єкта), що представляє собою набір структурованих і неструктурованих інформаційних контейнерів (наборів даних) у рамках цілісної інформаційної системи, що містять необхідні геометричні, фізичні, функціональні та інші характеристики об'єкта, на основі яких розробляється документація, що супроводжує життєвий цикл об'єкта (проектна та кошторисна документація, рекомендації щодо експлуатації) [11]. Це сприяє процесам проектування, реконструкції та подальшої експлуатації і є надійною основою для прийняття рішень;

– збереження автентичності шляхом максимального збереження оригінальних елементів будівлі;

– адаптивне використання простору через збереження оригінальних просторових характеристик (високих стель, великих вікон, відкритого планування) та інтеграція їх у нову функцію (функції) [5, 15];

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

– технологія штучного інтелекту дозволяє підвищити якість проектування та оптимізувати дизайн, сприяє забезпеченню контролю якості робіт, моніторингу безпеки, зокрема при застосуванні для аналізу планів, виявлення прихованих комунікацій або оцінки стану матеріалів;

– технологія вибіркового демонтажу, яка передбачає розбирання лише окремих частин будівлі чи споруди, а не всього об'єкта в цілому, що дозволяє підготувати об'єкт до реконструкції, не руйнуючи його повністю, завдяки чому досягається мінімізація обсягів будівельних відходів та збереження елементів для повторного використання на основі принципів циркулярної економіки;

– ремедіація ґрунтів, яка передбачає очищення забруднених промислових територіях шляхом виведення забруднювачів з навколишнього середовища, зокрема з ґрунту, підземних, поверхневих вод та атмосфери, із застосуванням фізичних, біологічних або хімічних методів для забезпечення екологічної безпеки ревіталізованого об'єкта [8];

– підсилення конструктивних елементів будівель;

– застосування легких будівельних конструкцій, зокрема металевих конструкцій, що забезпечує зменшення навантаження на основу та фундамент;

– технологія інтернету речей для оптимізації використання ресурсів, управління кліматом, освітленням та безпекою будівель;

– забезпечення енергетичної ефективності будівель, зменшення споживання енергії у будівлях, зокрема шляхом використання ефективних теплоізоляційних матеріалів та систем вентилюваних фасадів [1];

– застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема встановлення сонячних панелей, теплових насосів і систем рекуперації тепла для зменшення експлуатаційних витрат та вуглецевого сліду.

Застосування такого комплексу технологій і підходів до ревіталізації невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення дозволяє перетворити занедбані промислові будівлі на сучасні, функціональні та привабливі простори, які відповідають вимогам сталого розвитку міст.

Щодо організації ревіталізації об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення можна запропонувати декілька підходів:

– інтегрований підхід, який передбачає перетворення всього комплексу будівель і споруд для створення цілісного міського середовища з належними комунікаціями, дорогами, зонами відпочинку та об'єктами соціально-побутового призначення; в результаті забезпечується якісний, гармонійний розвиток території; відповідно такий підхід потребує залучення значних інвестицій і зазвичай тривалого часу для реалізації;

– фрагментарний підхід, який передбачає ревіталізацію окремих будівель або невеликих ділянок у межах промислової зони; такий підхід забезпечує гнучкість, потребує меншого обсягу інвестицій і дозволяє швидше реалізувати проекти.

Вибір того чи іншого підходу до організації ревіталізації об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення залежатиме від масштабів проекту, фінансових можливостей, цілей інвесторів, а також містобудівних умов і обмежень.

Для визначення оптимальної послідовності реконструкції промислових будівель у проектах ревіталізації пропонується комплексний підхід, який ґрунтується на аналізі множини визначальних факторів із урахуванням пріоритетів проекту.

Як основні критерії для визначення оптимальної послідовності реконструкції промислових будівель у проектах ревіталізації доцільно застосовувати такі:

– технічний стан і безпека, що є головним пріоритетом;

– майбутнє функціональне використання (це зокрема впливає на обсяги необхідних робіт і їх пріоритетність);

– забезпечення комунікаціями (оцінювання існуючих інженерних мереж, під'їзних шляхів тощо; будівлі, де мережі вже функціонують, можуть бути швидше введені в експлуатацію);

– фінансові критерії: послідовність ревіталізації об'єктів часто залежить від фінансової моделі проекту та необхідності швидкої окупності капітальних вкладень; об'єкти, які потребують мінімальних інвестицій і можуть швидко

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

почати приносити дохід (наприклад, здача в оренду під склади, креативні простори тощо), часто реконструюються першими для залучення стартового капіталу та демонстрації успіху проєкту; якщо проєкт є довготривалим, то послідовність ревіталізації об'єктів може визначатися траншами інвестицій або етапами кредитування;

– привабливість об'єкту ревіталізації для клієнтів (покупців або орендарів): об'єкти з високим попитом (наприклад, офіси в центральній частині міста) можуть мати пріоритет над об'єктами, що потребують тривалого пошуку резидентів (наприклад, спеціалізовані культурні центри);

– містобудівні та соціальні критерії: ревіталізація будівель, розташованих уздовж головних вулиць або поблизу житлових районів, може мати більший позитивний соціальний ефект, покращуючи загальний вигляд району та зменшуючи негативний вплив занедбаних територій на довкілля;

– організація будівельних робіт і логістики таким чином, щоб не перешкоджати функціонуванню вже ревіталізованих будівель.

У цілому ж послідовність ревіталізації невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення визначається шляхом пошуку балансу між потребами у безпеці, енергоефективності, комфорті, інклюзивності будівель і фінансовою доцільністю з урахуванням цілей сталого розвитку (рис. 2).



Рис. 2. Ревіталізована будівля трамвайного депо під інноваційно-креативний простір Lem Station у м. Львів [12]

Fig. 2. Revitalised tram depot building converted into Lem Station, an innovative and creative space in Lviv [12]

Наприклад, якщо при визначенні послідовності ревіталізації об'єктів перевага надається фінансовому критерію, то спочатку перетворюють будівлі під офісні та торговельні приміщення, які можуть забезпечити швидку окупність інвестицій, а вже потім перетворюють будівлі під житлові та соціальні об'єкти.

Якщо ж при визначенні послідовності ревіталізації об'єктів перевага надається соціальному критерію, то спочатку ревіталізують будівлю під культурний центр або громадський простір з метою привернення до нього уваги, а вже потім ревіталізують будівлі під об'єкти комерційного призначення.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в застосуванні системного підходу до організації процесів ревіталізації колишніх об'єктів транспортної інфраструктури, що передбачає поетапний аналіз послідовності перетворення будівель і споруд із урахуванням визначальних чинників впливу на вибір їх майбутньої функції. Такий підхід забезпечує прийняття раціональних рішень в умовах обмежених ресурсів.

Практична значимість роботи полягає в тому, що запропонований підхід до визначення оптимальної послідовності реконструкції невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення у проєктах ревіталізації забезпечує органи державної влади, органи місцевого самоврядування та інвесторів інструментарієм для прийняття ефективних рішень в умовах часових і ресурсних обмежень, із урахуванням технічних, юридичних та фінансових аспектів.

Висновки

Ревіталізація невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення, крім вирішення містобудівних, економічних, екологічних та соціальних завдань перетворення деградованих територій, може розглядатися як ефективний підхід до забезпечення досягнення цілей сталого розвитку міст. При цьому задачі перетворення міської забудови через переосмислення функцій вже існуючих будівель замість будівництва нових об'єктів корелюють із задачами щодо

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

створення сталого житла, економічного зростання, відповідального виробництва і споживання.

Застосування запропонованого підходу до визначення оптимальної послідовності рекон-

струкції невикористовуваних об'єктів транспортної інфраструктури зі зміною їх функціонального призначення у проєктах ревіталізації дозволяє визначити пріоритетність із урахуванням впливу множини визначальних факторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-31:2021. *Теплова ізоляція та енергоефективність будівель* [Чинний від 2022–09–01]. Київ : Мінрегіон України, 2022. 23 с.
2. Ісаченко І. Операція «Хафенсіті». Найбільшому урбан-проєкту Європи 20 років. *PRAGMATIKA.MEDIA*. 03 березня 2020. URL: <https://pragmatika.media/operacija-hafensiti-najbilshomu-urban-proiektu-ievropi-20-rokiv/>
3. Ковальов В. В. *Розвиток науково-методологічних основ організаційно-технологічного проєктування реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення* : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.08. Дніпро : ДВНЗ ПДАБА, 2021. 401 с.
4. Ковальов В. В., Броневицький А. П., Заяць С. І., Кравчуновська Т. С., Косолапов А. Ф. Особливості промислових будівель та робіт із їх реконструкції зі зміною функціонального призначення. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 4. С. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.101.976>
5. Ковальський В. П., Абрамович В. С. Принципи якісної ревіталізації громадських просторів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. Т. 31, № 2. С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-54-59>
6. Кравчуновська Т. С., Броневицький С. П., Ковальов В. В., Данилова Т. В., Ткач Т. В. *Планування розміщення і організація будівництва та реконструкції об'єктів доступного житла з урахуванням містоформуючих особливостей територій великих міст* : монографія. Дніпро : Літограф, 2019. 228 с.
7. Креативний кластер Києва. *Art zavod Platforma*. 2022. URL: <https://artzavodplatforma.com/wp-content/uploads/2022/06/azp.pdf>
8. Ліщук А. М., Парфенюк А. І., Драга М. В., Городиська І. М. *Концепція реабілітації забруднених ґрунтів* / за наук. ред. О. І. Фурдичка. Київ : ІАП НААН, 2020. 16 с. URL: https://www.agroeco.org.ua/wp-content/uploads/Publications/reabilitatsiia_hruntiv.pdf
9. Осипова А. О. *Ревіталізація процесів будівельного виробництва. Оптимізація організаційно-технологічних рішень* : монографія. Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2022. 226 с.
10. Про музей муніципального будівництва у Кракові. *Krakow-future.eu*. 2022. URL: <https://krakow-future.eu/uk/eternal-pro-muzej-municzypalnogo-budivnyctva-u-krakovi>
11. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації : Розпорядження Каб. Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-r#Text>
12. Простір Lem Station на території історичного трамвайного депо відкрили для відвідувачів. *ZAXID.NET*. 2025. URL: https://zaxid.net/u_lvovi_vidkrili_prostir_lem_station_na_teritoriyi_istorichnogo_tramvaynogo_depo_n1604378
13. Рибчинський О. В. *Формування і ревіталізація середмість історичних міст України* : дис. ... д-ра архітектури : 18.00.01. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017. 438 с.
14. Сич О. А., Ситник Н. С., Стасишин А. В., Круглякова В. В. *Ревіталізація міст – досвід Європейського Союзу для України* : навч. посіб. / за заг. ред. О. А. Сич. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2023. 312 с.
15. Субін-Кожевникова А. С., Хороша О. І., Голосенко А. С. Основні принципи та прийоми реновації промислової забудови на прикладі м. Вінниці. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. Т. 31, № 2. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-67-72>
16. History De Hallen Amsterdam. From tram depot to the beating heart of Amsterdam-West. *De Hallen Amsterdam*. 2025. URL: <https://www.dehallen-amsterdam.nl/en/history>
17. Ivashko Yu., Ivashko O., Dmytrenko A. Revitalization of urban areas in the light of social and environmental problems. *Spatial Development*. 2023. № 5. С. 33–50. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.33-50>
18. Kusiak J. Revitalizing urban revitalization in Poland: towards a new agenda for research and practice. *Urban Development Issues*. 2019. Vol. 63. P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.2478/udi-2019-0013>

19. Parysek Jerzy J. Urban revitalization in Poland: problems, dilemmas, challenges and hopes. *Studia Regionalna. Journal of the Polish Academy of Sciences*. 2017. Vol. 50. P. 103–121.
DOI: <https://doi.org/10.12657/studreg-50-06>
20. Selvina D. Revitalization of Industrial Buildings. *International Journal of Applied Sciences: Current and Future Research Trends (IJASCFRT)*. 2022. Vol. 15. № 1. P. 16–29. URL: https://ijascftrjournal.isrra.org/Applied_Sciences_Journal/article/view/1277/82
21. The refurbishment of St Katharine Docks marina in London: an urban project that looks after the environment. *Poralu Marine*. 2025. URL: <https://www.poralu.com/en/2559/>

T. S. KRAVCHUNOVSKA^{1*}, K. V. BALAKIN²

^{1*}Dep. of Organization and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov Str., 24a, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 635 36 08, e-mail t.s.kravchunovska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0986-8995

²Dep. of Organization and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov Str., 24a, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 796 64 12, e-mail balakinkonst@gmail.com, ORCID 0009-0007-8329-3505

Substantiation of the Optimal Sequence of industrial Building Reconstruction in Revitalization Projects, Taking into Account Their Future Function

Purpose. Development of a methodological approach to the revitalization of former transport infrastructure objects, taking into account their future function (functions) within the constraints of time and resources. **Methodology.** A systems approach to modelling the revitalization process in terms of substantiating the sequence of inclusion of non-functioning transport infrastructure objects in the project; a comprehensive approach to forming a set of determining factors of exogenous and endogenous nature. **Findings.** A methodological approach to the revitalization of former transport infrastructure objects has been improved, taking into account the preservation of the authenticity of buildings, the adaptive use of their space, the application of building information modelling technologies, artificial intelligence, the Internet of Things, selective dismantling of structures, and soil remediation to meet safety, comfort, inclusiveness, and energy efficiency requirements, ensuring the commissioning of objects with specified technical and economic characteristics within existing resource constraints. **Originality.** A systems approach has been applied to the organization of the revitalization processes of former transport infrastructure objects, which involves a step-by-step analysis of the sequence of transformation of buildings and structures, taking into account the determining factors influencing the choice of their future function; at the same time, the tasks of transforming urban development by rethinking the functions of existing buildings instead of constructing new objects correlate with the tasks of creating sustainable housing, economic growth, responsible production and consumption. **Practical value.** The task of transforming urban development by rethinking the functions of existing industrial buildings instead of constructing new objects correlates with the tasks of creating sustainable housing, economic growth, responsible production and consumption. The proposed approach to determining the optimal sequence for the reconstruction of unused transport infrastructure objects with a change in their functional purpose in revitalization projects allows priorities to be set taking into account the influence of a number of determining factors and provides state authorities, local self-government bodies and investors with tools for making effective decisions under time and resource constraints, taking into account technical, legal and financial aspects.

Keywords: revitalization; reconstruction; complex approach; determining factors; criteria; optimal sequence of reconstruction of objects; sustainable development

REFERENCES

1. *Теплова ізоляція та енергоефективність будівель, 23 ДБН В.2.6-31:2021* (2022). (in Ukrainian)
2. Isachenko, I. (2020). *Operatsiia «Khafensiti». Naibilshomu urban-proiektu Yevropy 20 rokiv*. PRAGMATIKA.MEDIA. Retrieved from <https://pragmatika.media/operacija-hafensiti-najbilshomu-urban-proiektu-ievropi-20-rokiv/> (in Ukrainian)
3. Kovalov, V. V. (2021). *Rozvytok naukovo-metodolohichnykh osnov orhanizatsiino-tekhnohichnoho proektuvannia rekonstruktsii promyslovykh budivsel zi zminoiu funktsionalnoho pryznachennia* (Dr.Sc. dissertation). Dnipro: DVNZ PDABA. (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Kovalov, V. V., Bronevtskyi, A. P., Zaiats, Ye. I., Kravchunovska, T. S., & Kosolapov, A. F. (2023). Peculiarities of industrial buildings and their reconstruction with a change of functional purpose. *Ukrainian journal of civil engineering and architecture*, 4, 101-110.
DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.101.976> (in Ukrainian)
5. Kovalskyi, V. P., & Abramovych, V. S. (2021). Principles of qualitative revitalization of public spaces. *Modern technology, materials and Design in construction*, 31(2), 54-59.
DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-54-59> (in Ukrainian)
6. Kravchunovska, T. S., Bronevtskyi, S. P., Kovalov, V. V., Danylova, T. V., & Tkach, T. V. (2019). *Planuvannia rozmishchennia i orhanizatsiia budivnytstva ta rekonstruksii ob'ektiv dostupnogo zhytla z urakhu-vanniam mistoformuiuchykh osoblyvostei terytorii velykykh mist: monografiya*. Dnipro: LitoHraf. (in Ukrainian)
7. *Kreatyvnyi klaster Kyieva*. (2022). Art zavod Platforma. Retrieved from <https://artzavodplatforma.com/wp-content/uploads/2022/06/azp.pdf> (in Ukrainian)
8. Lishchuk, A. M., Parfeniuk, A. I., Draha, M. V., & Horodyska I. M. (2020). *Kontseptsiiia reabilitatsii za-brudnennykh hruntiv*. Kyiv: IAP NAAN. Retrieved from https://www.agroeco.org.ua/wp-content/uploads/Publications/reabilitatsiia_hruntiv.pdf (in Ukrainian)
9. Osypova, A. O. (2022). *Revitalizatsiia protsesiv budivelnoho vyrobnytstva. Optyimizatsiia orhanizatsiino-tehnolohichnykh rishen: monografiya*. Kyiv: FOP Yamchynskyi O. V. (in Ukrainian)
10. *Pro muzei munitsypalnogo budivnytstva u Krakovi*. (2022). Krakow-future.eu. Retrieved from <https://krakow-future.eu/uk/eternal-pro-muzej-municzypalnogo-budivnyctva-u-krakovi> (in Ukrainian)
11. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2021). *Pro skhvalennia Kontseptsii vprovadzhennia tekhnologii budivelnoho informatsiinoho modeliuвання (VIM-tekhnologii) v Ukraini ta zatverdzhennia planu zakhodiv z ii realizatsii*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-p#Text> (in Ukrainian)
12. *Prostir Lem Station na terytorii istorichnogo tramvainoho depo vidkryly dlia vidviduvachiv*. (2025). ZAXID.NET. Retrieved from https://zaxid.net/u_lvovi_vidkrili_prostir_lem_station_na_teritoriyi_istorichnogo_tramvaynogo_depo_n1604378 (in Ukrainian)
13. Rybchynskyi, O. V. (2017). *Formuvannia i revitalizatsiia seredmist istorichnykh mist Ukrainy* (Dr.Sc. dissertation). Lviv: NU «Lvivska politehnika». (in Ukrainian)
14. Sych, O. A., Sytnyk, N. S., Stasyshyn, A. V., & Kruhliakova, VA. V. (2023). *Revitalizatsiia mist – dosvid yevropeiskoho soiuzu dlia Ukrainy*. Lviv: LNU imeni Ivana Franka. (in Ukrainian)
15. Subin-Kozhevnikova, A. S., Khorosha, O. I., & Holosenko, A. S. (2021). Basic principles and techniques of renovation of industrial buildings on the example of Vinnytsia. *Modern technology, materials and Design in construction*, 31(2), 67-72. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-67-72> (in Ukrainian)
16. *History De Hallen Amsterdam. From tram depot to the beating heart of Amsterdam-West*. (2025). De Hallen Amsterdam. Retrieved from <https://www.dehallen-amsterdam.nl/en/history> (in English)
17. Ivashko, Yu., Ivashko, O., & Dmytrenko, A. (2023). Revitalization of urban areas in the light of social and environmental problems. *Spatial Development*, 5, 33-50.
DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.33-50> (in English)
18. Kusiak, J. (2019). Revitalizing urban revitalization in Poland: towards a new agenda for research and practice. *Urban Development Issues*, 63, 17-23. DOI: <https://doi.org/10.2478/udi-2019-0013> (in English)
19. Parysek, Jerzy J. (2017). Urban revitalization in Poland: problems, dilemmas, challenges and hopes. *Studia Regionalna. Journal of the Polish Academy of Sciences*, 50, 103-121.
DOI: <https://doi.org/10.12657/studreg-50-06> (in English)
20. Selvina, D. (2022). Revitalization of Industrial Buildings. *International Journal of Applied Sciences: Current and Future Research Trends (IJASCFRT)*, 5(1), 16-29. Retrieved from https://ijascftrjournal.isrra.org/Applied_Sciences_Journal/article/view/1277/82 (in English)
21. *The refurbishment of St Katharine Docks marina in London: an urban project that looks after the environment*. (2025). Poralu Marine. Retrieved from <https://www.poralu.com/en/2559/> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.08.2025

Прийнята до друку: 19.12.2025

УДК 624.191.8:351.862

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, Д. О. БАННИКОВ², І. С. ОСТАПЕНКО³, М. В. ГЕРНИЧ⁴

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

³Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, ННІ ДІПТ, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 09, ел. пошта i.s.ostapenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2232-7138

⁴Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, ННІ ДІПТ, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 784 51 17, ел. пошта m.v.hernych@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5069-4798

Засади концепції зворотної конверсії для обґрунтування застосування підземних споруд метрополітену в якості укриттів

Мета. Автори ставлять за мету визначити засади концепції зворотної конверсії для обґрунтування застосування підземних споруд метрополітену в якості укриттів об'єктів критичної інфраструктури. **Методика.** У статті проаналізовано та класифіковано вже збудовані укриття, а також запропоновані на будівельному ринку України споруди подвійного призначення. Визначено особливості захисних споруд, їхні конструктивні параметри, переваги й недоліки. Відмічено, що поява нових ідей та навіть формування концепцій, що охоплюють присвячені укриттям суміжні області, пов'язується з освоєнням підземного простору великих міст, тобто з областю, що вже була розроблена раніше. Доведено, що український досвід застосування захисних споруд надає можливість створення нової концепції, в якій вже відомі конструкції підземних споруд цивільного призначення можуть успішно виконувати роль укриттів. **Результати.** Для обґрунтування застосування підземних споруд в якості укриттів для об'єктів критичної інфраструктури запроваджено нову концепцію, яка отримала назву «зворотна конверсія». Зворотна конверсія представляє собою процес переносу суто цивільних конструктивно-технологічних рішень у військову сферу, а також в область, що близька до неї, а саме область спорудження захисних споруд. Обґрунтовано, що односклепінчаста станція метрополітену мілкого закладення, споруджена із монолітного залізобетону, й колонна станція метрополітену мілкого закладення, змонтована із збірного залізобетону, мають високий потенціал в якості укриттів. Доведено, що конструктивно-технологічні рішення будівництва підземних споруд метрополітену (станції мілкого закладення) переносяться до області спорудження захисних споруд, а не використовуються в якості об'єктів подвійного призначення. **Наукова новизна.** В статті вперше наведені засади концепції зворотної конверсії, яка надає можливість розширення простору рішень створення захисних споруд. **Практична значимість** полягає в обґрунтуванні станцій метрополітену мілкого закладення в якості укриттів об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: зворотна конверсія; метрополітен; підземна споруда; захисна споруда; укриття; об'єкт подвійного призначення; критична інфраструктура

Вступ

Необхідність забезпечення безпеки цивільного населення, об'єктів критичної й транспортної інфраструктури та безперервності виробничих процесів в умовах застосування противником засобів ураження, що охоплюють всю територію України, стала потужним стимулом для активного розвитку будівельної галузі у сфері створення укриттів, в тому числі й для об'єктів критичної інфраструктури [7, 13].

На сьогодні ця проблема, вирішення якої відмічене гострою актуальністю, розглядається з декількох ракурсів, кожен з яких формує нові концепції захисту у відповідності до особливостей підходів [8, 10]. По-перше, на початку повномасштабного вторгнення, коли підземні споруди метрополітену та інші застосовувалися ситуативно, почали з'являтися методологічні кроки, що поступово окреслюють концепцію використання вказаних споруд як укриттів та об'єктів подвійного призначення [3]. По-друге,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

почала розвиватися область саме захисних споруд, яка вже має певні напрацювання [12]. По-третє, продовжуються наукові розробки в області створення укриттів в рамках державної концепції «Країна-фортеця» [1].

Окрім цих магістральних напрямів, слід також відзначити, що потенційна поява нових ідей та навіть формування концепцій, що охоплюють присвячені укриттям суміжні області, пов'язується з областю, що вже була розроблена детально й планомірно, а саме освоєння підземного простору великих міст. Ця систематична практика, що включала в себе дослідження транспортних систем (тунелі й метрополітени), підземних споруд й об'єктів різного призначення (від магазинів до суспільно-культурних просторів) й чисто утилітарного (паркінги, склади, резервуари тощо) має низку напрацьованих й апробованих рішень, які можуть після достатнього наукового обґрунтування бути використані для створення захисних споруд [16].

Деякі рішення, що прийняті в Україні і вже поступово склали стратегію розвитку фонду захисних споруд цивільного захисту [14], дозволяють максимально широко розглянути проблему захисних споруд для цивільного населення й об'єктів критичної та транспортної інфраструктури. Певні концептуальні прийоми, які є характерними для нашої країни, можуть вважатися такими, що окреслюють український досвід як не менш творчий, ніж фінський або ізраїльський [1, 16].

Таким чином, враховуючи вже існуючі напрацювання в області захисних споруд, слід запропонувати нову концепцію, що враховує накопичений досвід освоєння підземного простору, який можна застосувати в іншій якості.

Мета

Метою наукової статті є визначення засад концепції зворотної конверсії для обґрунтування застосування підземних споруд метрополітену в якості укриттів об'єктів критичної інфраструктури.

Методика

Основні положення щодо проектування захисних споруд цивільного захисту та споруд подвійного призначення, призначених для ук-

риття населення визначені в нормативному документі [4].

Проаналізувавши вже збудовані укриття та запропоновані на будівельному ринку споруди подвійного призначення можна їх класифікувати, розділивши на п'ять груп конструкцій:

1. Монолітні залізобетонні.
2. Збірні залізобетонні.
3. Комбіновані залізобетонні.
4. Модульні залізобетонні.
5. Металеві.

Всі вказані вище типи конструкцій розташовують на поверхні землі, повністю або частково заглиблюють у ґрунт.

Монолітні залізобетонні укриття являють собою цілісні, безшовні конструкції, виконані шляхом укладання бетонної суміші в спеціально підготовлену опалубку, армовану металевим каркасом. Ця технологія забезпечує високу міцність, жорсткість та герметичність споруди.

Будівництво монолітних залізобетонних укриттів широко застосовується для створення безпечних умов при організації навчального процесу в закладах середньої освіти. В переважній більшості протирадіаційні укриття (ПРУ), які визначені нормативними документами, отримують не просто подвійне призначення. Саме цей український досвід надає можливість розпочати створення нової концепції, засади якої буде окреслено нижче. Досвід будівництва підземних шкіл, який найплідніше проявився в м. Запоріжжі, демонструє інверсію, а саме: не ПРУ виконує роль підземної школи (подвійне призначення ПРУ), а підземна школа може слугувати й ПРУ.

Така підземна школа, що заглиблена від поверхні землі на 2...3 м, є одноповерховою, майже прямокутної форми в плані із загальними розмірами в осях 45×30 м, висотою поверху (від підлоги до стелі) 2,7 м [11]. Споруда виконується в монолітному залізобетонному каркасі, елементами жорсткості якої слугують стіни-діафрагми товщиною 300 мм та хрестоподібні колони товщиною стінок 600 мм. Внутрішні перегородки виконуються з керамічної повнотілої цегли М150 на цементно-піщаному розчині М100. Загальний вигляд ПРУ/школи із основними висотними відмітками зображено на рис. 1.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

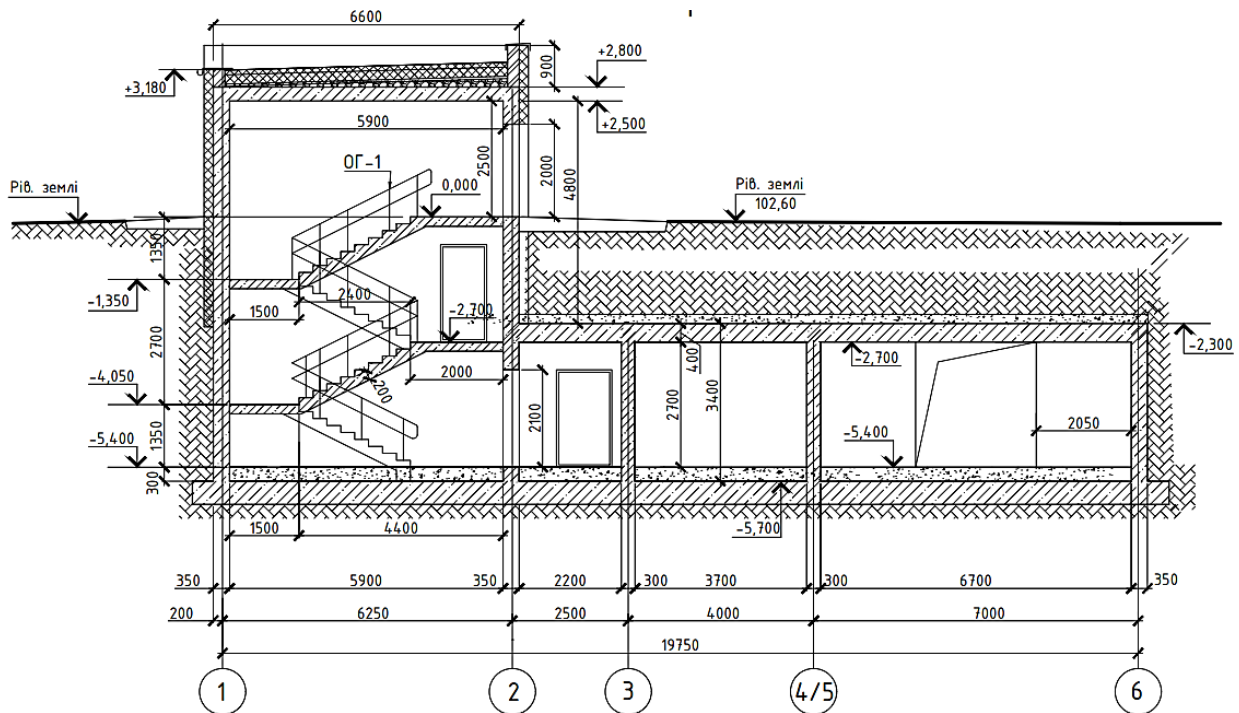


Рис. 1. Загальний вигляд монолітного залізобетонного ПРУ [11]

Fig. 1. General view of a monolithic reinforced concrete shelter [11]

Технологія спорудження монолітних залізобетонних укриттів є відомою та багаторазово відпрацьованою.

Переваги монолітних залізобетонних укриттів:

- підвищена міцність та стійкість до руйнівних факторів (ударні хвилі, вибухові навантаження, обвалення сусідніх будівель);
- високий рівень герметичності (відсутність швів мінімізує ризик проникнення води та газів, отруйних речовин, радіоактивного пилю);
- можливість створення укриттів складної конфігурації (дозволяє інтегрувати укриття з існуючими спорудами);
- довговічність та надійність (за якісного спорудження служать десятиліттями, не потребуючи значних ремонтів).

Недоліки монолітних залізобетонних укриттів:

- тривалість будівельного циклу;
- висока вартість опалубних робіт (вартість

матеріалів опалубки, встановлення та демонтаж);

- залежність від погодних умов;
- складність внесення змін після бетонування.

Збірні залізобетонні укриття представляють собою конструкції, що складаються з окремих елементів, виготовлених в заводських умовах та змонтованих на місці експлуатації [5]. За рахунок менших витрат часу на спорудження, порівняно з монолітними залізобетонними укриттями, збірні залізобетонні споруди набули широкого застосування. На ринку України запропоновані різні варіанти збірних залізобетонних укриттів для захисту від 10 людей та більше (рис. 2).

Технічні характеристики споруд, за потреби, можуть бути змінені в напрямку як підвищення так і пониження вимог за рахунок адаптації виробництва блоків під запит замовника.

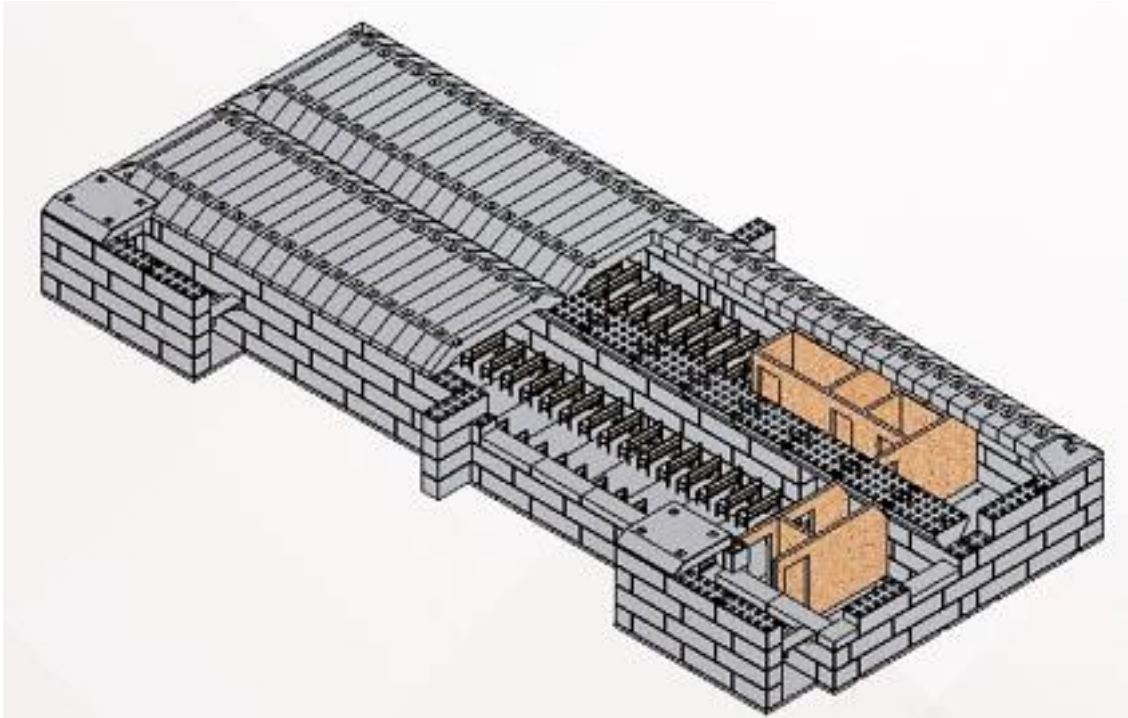


Рис. 2. Загальний вигляд ПРУ для 200 осіб
(виробництво заводу залізобетонних виробів №1, м. Кременчук)

Fig. 2. General view of a radiation shelter for 200 people
(production of reinforced concrete products plant No. 1, Kremenchuk)

Переваги збірних залізобетонних укриттів:

- міцність матеріалу блоків за рахунок заводського виготовлення;
- швидкість монтажу;
- незалежність від погодних умов;
- універсальність та адаптивність до різних проектів;

– економічність за рахунок серійного виготовлення та зниження часу на будівельно-монтажні роботи;

– можливість заміни окремих збірних елементів у разі їх часткового пошкодження.

Недоліки збірних залізобетонних укриттів:

– обмеження геометричних форм розмірами стандартизованих блоків;

– потреба у спеціалізованій будівельній техніці та улаштуванні майданчиків для її встановлення;

– порівняно складна герметизація стиків;

– складність внесення змін до готової конструкції;

– залежність від виробника.

Комбіновані залізобетонні конструкції поєднують технології створення монолітного та

збірного залізобетону [6]. Це означає, що певні елементи конструкції, наприклад, фундаментна плита, стіни, перекриття, виконуються шляхом укладання монолітного бетону, тоді як інші елементи (окремі ділянки стін, перегородки, сходові марші) є готовими залізобетонними виробами, виготовленими на заводі і готовими для монтажу на будівельному майданчику.

Можливі комбінації збірного і монолітного залізобетону в конструкції укриття:

1. Монолітний фундамент, збірні стіни та перекриття.

2. Фундаментна плита та стіни – монолітні, перекриття – збірні.

3. Монолітний каркас (колони, балки), збірні стінові панелі та плити перекриття (рис. 3).

4. Частина стін, що контактують з ґрунтом – монолітні, внутрішні перегородки – збірні.

5. Збірні об'ємні модулі та монолітні з'єднувальні елементи.

6. Збірні стінові елементи з монолітним армуючим контуром.

7. Інші комбінації.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

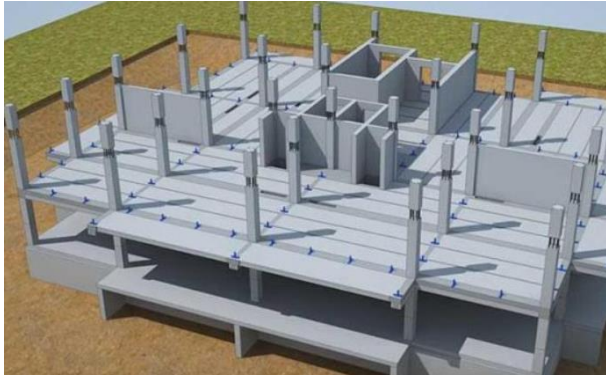


Рис. 3. Загальний вигляд комбінованого (збірно-монолітного) укриття

Fig. 3. General view of a combined (prefabricated-monolithic) shelter

У випадку коли збірні блоки є пустотілими і в подальшому передбачають заповнення бетонною сумішшю, тобто відіграють роль незмінної опалубки, тоді можливо виключити такий недолік монолітного бетонування як монтаж і демонтаж опалубки.

Переваги комбінованих залізобетонних конструкцій (крім зазначених для збірних та монолітних конструкцій):

- оптимізація міцності та герметичності;
- гнучкість проектування та адаптація до місцевих умов;
- прискорення загальних термінів будівництва за рахунок паралельного виготовлення збірних елементів на заводі.

Недоліки комбінованих залізобетонних конструкцій:

- складність проектування та розрахунків;
- ризики, пов'язані з забезпеченням якості з'єднань.

Модульні залізобетонні укриття складаються з окремих готових об'ємних блоків (модулів), виготовлених на заводі.

Використання окремих модулів як укриттів обмежується можливостями транспортних засобів призначених для їх перевезення, тому в переважній більшості окремі модулі призначені для невеликої кількості людей (до 10 осіб).

Окремі модулі можуть з'єднуватись між собою, утворюючи більше за обсягом та площиною укриття необхідного розміру та конфігурації в такому разі їх можна розглядати як збірні залізобетонні укриття (рис. 4).



Рис. 4. Збірне модульне укриття у стилі «будинків гобітів» [2]

Fig. 4. Prefabricated modular shelter in the style of “hobbit houses” [2]

Металеві конструкції укриттів використовуються для улаштування укриттів особистого користування для невеликої кількості людей (рис. 5).



Рис. 5. Металеве гофроване укриття [9]

Fig. 5. Metal corrugated shelter [9]

Для спорудження укриттів підвищеної місткості метал використовують в якості основних елементів конструкції, що сприймають головні зусилля, інші елементи конструкції споруджують із збірного або монолітного залізобетону.

Переваги металевих конструкцій укриттів:

- менша маса елементів, порівняно з залізобетонними;
- прості та надійні способи з'єднання окремих елементів;
- можливість перекриття великих прольотів;
- незалежність від погодних умов;
- мобільність та можливість передислокації;
- менші, за рахунок зменшення власної ваги конструкції, вимоги до фундаменту;
- висока технологічність виробництва;

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

– стійкість до сейсмічних впливів, можливість пружної роботи окремих елементів без руйнувань;

– ремонтпридатність;

– зручність кріплення навісного обладнання до металевих елементів.

Недоліки металевих конструкцій укриттів:

– корозія, потребують спеціальної обробки;

– вогнестійкість, що є нижчою, ніж у залізобетону і потребує захисного шару;

– висока теплопровідність, що тягне потребу в утепленні;

– низька звукоізоляція, що потребує захисту від шуму;

– вразливість до уламків та ударної хвилі (залежно від товщини металу);

– при зварюванні елементів виникає потреба в кваліфікованих робітниках.

Проведений аналіз існуючих на ринку України та вже збудованих захисних споруд цивільного захисту дозволяє класифікувати їх за матеріалом несучих конструкцій на п'ять основних типів (монолітні, збірні, комбіновані, модульні залізобетонні та металеві). Кожен з цих типів має свої характерні технологічні особливості спорудження, а також визначені переваги та недоліки, що суттєво впливають на їхню міцність, герметичність, швидкість зведення, вартість та інші експлуатаційні характеристики.

Результати

Проаналізовані типи укриттів із визначенням їхніх переваг та недоліків свідчать про те, що потенціал будівельних конструкцій, які виступають в захисній ролі або в якості об'єктів подвійного призначення, ще не вичерпаний. Для розвитку цього потенціалу слід виявити можливість застосування вже відомих і широко апробованих підземних споруд, які мають високу міцність, стійкість та довговічність, а також можуть бути потенційними укриттями.

Для обґрунтування застосування підземних споруд в якості укриттів для об'єктів критичної інфраструктури слід запровадити нову концепцію, яка має назву «зворотна конверсія». Відомо, що в загальному сенсі конверсія (лат. *conversio*) представляє собою процес обміну, заміни, переформатування або переходу чи переносу з однієї області в іншу; у вузькому застосуванні терміну конверсія військового виро-

бництва представляє собою процес переходу підприємств військово-промислового комплексу у сферу цивільного виробництва із відповідною заміною та переорієнтацією продукту.

Таким чином, якщо розширити первинну концепцію, зворотна конверсія представляє собою процес переносу суто цивільних конструктивно-технологічних рішень у військову сферу, а також в область, що близька до неї, а саме область спорудження захисних споруд.

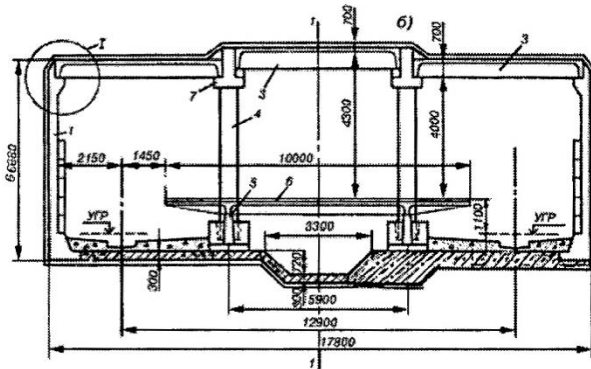
Найяскравішим прикладом зворотної конверсії є застосування підземних споруд метрополітену в якості укриттів. Слід підкреслити, що конструктивно-технологічні рішення будівництва підземних споруд метрополітену саме переносяться до області спорудження захисних споруд, а не використовуються в якості об'єктів подвійного призначення.

Саме ця відмінність характеризує концепцію зворотної конверсії, в ході реалізації якої, наприклад, конструкції станцій метрополітену мілкого закладення стають конструкціями укриття об'єктів критичної інфраструктури. Хід повномасштабної війни російської федерації проти України довів достатньо високу ефективність станцій метрополітену в якості захисних споруд, але досвід використання їх в Київському, Дніпровському й Харківському метрополітенах свідчить про недостатній рівень вивільнення потенціалу укриття. Збільшити цей рівень можливо, якщо позбутися основного призначення підземної споруди метрополітену під час процесу зворотної конверсії. Такий концептуальний крок дозволяє застосовувати вище згадані станційні конструкції, які вже мають чіткі конструктивно-технологічні рішення й інформацію про міцність та стійкість до осовливого впливу, як захисні споруди.

Для прикладу проаналізуємо дві найбільш розповсюджені станції метрополітену мілкого закладення, які успішно споруджувалися на метрополітенах України і мають високі показники міцності, стійкості й надійності. Колонна станція, що монтується із збірних елементів, які поєднуються за допомогою зварювання та омоноличування, як конструкція, що може мати значну зворотну засипку (3...20 м від перекриття середнього залу), відповідає вимогам укриттів цивільного населення й об'єктів критичної інфраструктури (рис. 6, а).

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

а – а



б – б

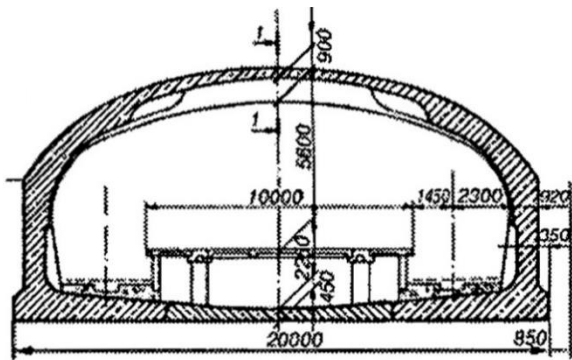


Рис. 6. Станції метрополітену мілкого закладення:
а – колонна із збірного залізобетону;
б – односклепінчаста із монолітного залізобетону [15]

Fig. 6. Shallow subway stations:
а – column made of precast reinforced concrete;
б – single-vaulted made of monolithic reinforced concrete [15]

Ця підземна споруда раніше отримала достатнє обґрунтування для випадку зміни товщини засипки, а також була досліджена для випадків спеціального навантаження (удари під час падіння літального апарату або вибухи) [16]. Відпрацьована технологія спорудження та достатні міцність й стійкість надають можливості її прямого застосування не як укриття або об'єкта подвійного призначення, а саме захисної споруди в рамках концепції зворотної конверсії.

Односклепінчаста станція мілкого закладення (рис. 6, а) характеризується тим, що внутрішній простір, на відміну від колонної станції, вільний від внутрішніх несучих елементів. Станція споруджується шляхом вкладання монолітного бетону по заздалегідь встановленим в проектне положення й поєднаним між собою

зварюванням арматурним каркасам. Після отримання бетоном проектної міцності, односклепінчаста станція являє собою дуже жорстку й міцну монолітну конструкцію із значним прогоном, що дозволяє використовувати її як захисну споруду з великим обсягом. Така конструкція також отримала наукове обґрунтування для деяких випадків спеціального навантаження, зокрема, вибухового і може бути не просто об'єктом подвійного призначення, тобто станцією, що слугує укриттям, а окремим укриттям підвищеної міцності та стійкості [15].

Таким чином, два підземні об'єкти метрополітену під час їх розгляду в межах концепції зворотної конверсії отримують нову роль у вигляді укриттів, які з самого початку позначені значною міцністю й стійкістю, доведеною практикою будівництва та експлуатації метрополітенів України.

Наукова новизна та практична значимість

В статті вперше наведені засади концепції зворотної конверсії, яка надає можливість розширення простору рішень створення захисних споруд на основі вже відомих конструкцій метрополітену.

Практична значимість дослідження полягає в обґрунтуванні станцій метрополітену мілкого закладення в якості укриттів об'єктів критичної інфраструктури.

Висновки

В науковій статті накреслено засади нової концепції, завдяки якій можливо обґрунтовано та ефективно застосовувати конструкції цивільного призначення в якості укриттів об'єктів критичної інфраструктури (концепція зворотної конверсії).

Проведений аналіз ситуації, що склалася в області створення укриттів та об'єктів подвійного призначення, дозволяє надати обґрунтування реалізації нової концепції, що розширює можливості створення об'єктів захисту критичної інфраструктури, спираючись на вже розроблені і апробовані конструктивні рішення підземних споруд метрополітену, які довели під час експлуатації високі показники міцності, стійкості та надійності.

В подальшому дослідження в рамках накресленої задачі планується продовжити, виконавши наукове обґрунтування розглянутих підземних споруд, що виступають в ролі укриттів

об'єктів критичної інфраструктури, у конкретних випадках дії спеціального навантаження, що є актуальним на сьогодні, під час воєнного стану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білик А. С. Захист об'єктів критичної інфраструктури при підземному розташуванні згідно державної концепції «Країна-фортеця». *Тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». 2024. Т. 2. С. 181–182.
2. Виробник модульних мобільних укриттів під ключ в Україні. *Hobbit House*. URL: <https://hobbithouse.com.ua/>
3. Гайко Г. І., Ган А. Л., Вапнічна В. В., Матвійчук І. О. Аналіз прогресивних конструктивних рішень підземних споруд цивільного захисту. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315286>
4. *ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. зі Зміною № 1*. [Чинний від 2023-11-01]. Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. 124 с.
5. *ДСТУ 9195:2022. Швидкосторуджувані захисні споруди цивільного захисту модульного типу. Основні положення*. [Чинний від 2023-03-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 15 с.
6. *ДСТУ Б В.2.6-154:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції. Збірно-монолітні конструкції. Правила проектування*. [Чинний від 2011-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 20 с.
7. Коваль М. В., Коваль В. В., Білик А. С., Коцюруба В. І., Кубраков О. М. *Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника* : монографія / за ред. А. С. Білика ; Генеральний штаб Збройних Сил України. Київ : Ліра-К, 2023. 185 с.
8. Коваль М. В., Коваль В. В., Коцюруба В. І., Білик А. С. Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України. *Наука і оборона*. 2022. № 3-4. С. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2022-20-3-4-11-16>
9. Метінвест розробив прототип багатофункціонального мобільного укриття для захисників. *Medianportal Групи Метінвест*. URL: <https://metinvest.media/ua/page/metinvest-rozrobiv-prototip-bagatofunkcionalnogo-moblnogo-ukrittya-dlya-zahisnikiv>
10. Некора В., Ніжник В., Поздєєв С., Луценко Ю., Михайлов В. Особливості та перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1(15). С. 149–157. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).149-157](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).149-157)
11. Нове будівництво протирадіаційного укриття на території Балабинської гімназії “Престиж” за адресою: вул. Престижна, 2-а, смт Балабине, Запорізький район, Запорізька область» (коригування) : експертиза проекту № 0113-24Е від 18.09.2024. ТОВ "ГРАДІПРОЕКТ-М". Запоріжжя : Південьекспертпроект, 2024. URL: https://e-construction.gov.ua/document_detail/doc_id=3707521986193262073/optype=6
12. Остапенко І. С., Банніков Д. О. Особливості визначення навантажень від дії сучасних засобів ураження. *Матеріали доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Логістика і транспортна безпека: Проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз»*. Дніпро: УДУНТ. 2025. С. 4–7. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/18998b23-9059-49f6-a6b0-5bc7e0dda63f>
13. *Про критичну інфраструктуру* : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX : станом на 21 верес. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
14. *Про схвалення Стратегії розвитку фонду захисних споруд цивільного захисту на період до 2034 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації* : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 04.03.2025 № 183-р : станом на 29 жовт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/183-2025-r#Text>
15. Тютькін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2020. 187 с.

16. Тютюкін О. Л. Трансформація цивільної стратегії освоєння підземного простору як основа створення нової концепції захисту. *Матеріали доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Логістика і транспортна безпека: Проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз»*. Дніпро: УДУНТ. 2025. С. 77–80.

O. L. TIUTKIN^{1*}, D. O. BANNIKOV², I. S. OSTAPENKO³, M. V. HERNYCH⁴

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Ukraine, Dnipro, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-475

²Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

³Dep. of Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 09, e-mail i.s.ostapenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2232-7138

⁴Dep. of Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 784 51 17, e-mail m.v.hernych@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5069-4798

Principles of the Concept of Reverse Conversion to Substantiate the Use of Underground Metro Structures as Shelters

Purpose. The authors set the goal of determining the principles of the concept of reverse conversion to substantiate the use of underground metro structures as shelters for critical infrastructure facilities. **Methodology.** The article analyzes and classifies already constructed shelters, as well as dual-purpose facilities offered on the construction market of Ukraine. The features of protective structures, their design parameters, advantages and disadvantages are determined. It is noted that the emergence of new ideas and even the formation of concepts covering adjacent areas dedicated to shelters is associated with the development of the underground space of large cities, that is, with an area that has already been developed earlier. It is proven that the Ukrainian experience in the use of protective structures provides the opportunity to create a new concept in which already known designs of underground civil structures can successfully perform the role of shelters. **Findings.** To substantiate the use of underground structures as shelters for critical infrastructure facilities, a new concept has been introduced, which has been called «reverse conversion». Reverse conversion is the process of transferring exclusively civilian design and technological solutions to the military sphere, as well as to the area close to it, namely the area of construction of protective structures. It is substantiated that a single-vaulted shallow metro station, built of monolithic reinforced concrete, and a column shallow metro station, assembled from precast reinforced concrete, have high potential as shelters. It is proven that design and technological solutions for the construction of underground metro structures (shallow stations) are transferred to the area of construction of protective structures, and are not used as dual-purpose facilities. **Originality.** The article first presents the principles of the concept of reverse conversion, which provides an opportunity to expand the space of solutions for creating protective structures. **Practical value** lies in the substantiation of shallow subway stations as shelters for critical infrastructure facilities.

Keywords: reverse conversion; metro; underground structure; protective structure; shelter; dual-purpose facility; critical infrastructure

REFERENCES

1. Bilyk, A. S. (2024). Zakhyst ob'ektiv krytychnoi infrastruktury pry pidzemnomu roztashuvanni zghidno derzhavnoi kontseptsii «Kraina-fortetsia». In *Tezy dopovidei XIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konfe-rentsii «Kompleksne zabezpechennia yakosti iekhnolohichnykh protsesiv ta system»* » (Vol. 2, pp. 181-182). Chernihiv: NU «Chernihivska politekhnika». (in Ukrainian)
2. Vyrobynyk modulnykh mobilnykh ukryttiv pid kliuch v Ukraini. *Hobbit House*. Retrieved from <https://hobbithouse.com.ua/> (in Ukrainian)
3. Haiko, H. I., Han, A. L., Vapnichna, V. V., & Matviichuk, I. O. (2024). Analysis of progressive design solutions for underground civil protection structures. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 26, 31-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315286> (in Ukrainian)
4. *Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu. zi Zminoiu № 1, 124 DBN V.2.2-5:2023*. (2023) (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

5. *Shvydkosporudzhuvani zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu modulnoho typu. Osnovni polozhennia, 15 DSTU 9195:2022.* (2023). (in Ukrainian)
6. *Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Zbirno-monolitni konstruksii. Pravyla proektuvannia, 20 DSTU B V.2.6-154:2010.* (2011). (in Ukrainian)
7. Koval, M. V., Koval, V. V., Bilyk, A. S., Kotsiuruba, V. I., & Kubrakov, O. M. (2023). *Osnovy inzhenernoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitrianoho napadu protyvnyka: monografiya.* Kyiv: Heneralnyi shtab Zbroinykh Syl Ukrainy. (in Ukrainian)
8. Koval, M. V., Koval, V. V., Kotsiuruba, V. I., & Bilyk, A. S. (2022). Orhanizatsiino-tekhnichni zasady pobudovy systemy inzhenernoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy. *Nauka i oborona*, 3-4, 11-16. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2022-20-3-4-11-16> (in Ukrainian)
9. Metinvest rozrobiv prototyp bahatofunktsionalnoho mobilnoho ukryttia dlia zakhysnykiv. *Mediaportal Hrupy Metinvest*. Retrieved from <https://metinvest.media/ua/page/metinvest-rozrobiv-prototyp-bahatofunktsionalnoho-mobilnoho-ukryttia-dlya-zakhysnykiv> (in Ukrainian)
10. Nekora, V., Nizhnyk, V., Pozdieiev, S., Lutsenko, Yu., & Mykhailov, V. (2023). Peculiarities and prospects of effective functioning of protective structures of civil protection in conditions of hostilities. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(15), 149-157. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.1\(15\).149-157](https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.1(15).149-157) (in Ukrainian)
11. *Nove budivnytstvo proty radiatsiinoho ukryttia na terytorii Balabynskoi himnazii «Prestyzh» za adresoiu: vul. Prestyzhna, 2-a, smt Balabyne, Zaporizkyi raion, Zaporizka oblast (koryhuvannia).* (2024). Ekspertyza proiektu No. 0113-24E, Hradproekt-M. Zaporizhia: Pivdenekspertproekt. Retrieved from https://e-construction.gov.ua/document_detail/doc_id=3707521986193262073/optype=6 (in Ukrainian)
12. Ostapenko, I. S., & Bannikov, D. O. (2025). Osoblyvosti vyznachennia navantazhen vid dii suchasnykh zasobiv urazhennia. In *Materialy dopovidei III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Lohistyka i transportna bezpeka: Problemy ta perspektyvy rozvytku v konteksti analizu suchasnykh vyklykiv i zahroz»* (pp. 4-7). Dnipro, Ukraina. Retrieved from <https://crust.ust.edu.ua/items/18998b23-9059-49f6-a6b0-5bc7e0dda63f> (in Ukrainian)
13. *Pro krytychnu infrastrukturu : Zakon Ukrainy vid 16.11.2021 № 1882-IX.* Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text> (in Ukrainian)
14. *Pro skhvalennia Stratehii rozvytku fondu zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu na period do 2034 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii : Rozporiadzh. Kab. Ministriv Ukrainy vid 04.03.2025 № 183-r.* Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/183-2025-%D1%80> (in Ukrainian)
15. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii.* Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
16. Tiutkin, O. L. (2025). Transformatsiia tsyvilnoi stratehii osvoiennia pidzemnoho prostoru yak osnova stvorennia novoi kontseptsii zakhystu. In *Materialy dopovidei III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Lohistyka i transportna bezpeka: Problemy ta perspektyvy rozvytku v konteksti analizu suchasnykh vyklykiv i zahroz»* (pp. 77-80). Dnipro, Ukraina. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії: 10.08.2025

Прийнята до друку: 12.12.2025

УДК 519.87:624.191.8

К. Є. ФЕДОРОВ¹, О. Л. ТЮТЬКІН^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 353 29 33, ел. пошта kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу

Мета. Автори ставлять за мету провести математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу методом скінченних елементів, а також виконати пошук компонент напружено-деформованого стану й з'ясувати міцність комбінованого кріплення, яке зводиться на основі Новоавстрійського методу спорудження тунелів. **Методика.** Для досягнення поставленої задачі було розроблено скінченно-елементну модель станції метрополітену пілонного типу у професійному розрахунковому комплексі Structure CAD for Windows. В моделі повною мірою відображені властивості комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції метрополітену пілонного типу. Змодельована половина станції метрополітену пілонного типу, моделі надані деформаційні характеристики, взяті з реальних інженерно-геологічних досліджень. Також до моделі прикладений комплекс граничних умов, які відповідають реальному деформуванню системи, а також сполучення навантажень. **Результати.** Під час чисельного аналізу отримано репрезентативну інформацію щодо напружено-деформованого стану станції метрополітену пілонного типу і з'ясовано, що наявність проходів, а також ділянок переходу проходу в пілон й навпаки, свідчить про значний їх перерозподіл. Детальний аналіз переміщень оправи довів, що деформування оправи середнього й бокового тунелів підтверджує майже однорідне переміщення станційної конструкції. Визначено максимальні значення напружень у постійній оправі станції метрополітену пілонного типу. Наявність системи пілонів, а також проходів формує неоднорідний напружений стан, який в комплексі з однорідним деформованим, представляє визначальну перевагу станційної конструкції такого типу. **Наукова новизна** результатів полягає у вперше отриманих в ході математичного моделювання результатах напружено-деформованого стану конструкції станції пілонного типу, що споруджується в міцних породах на основі NATM. **Практична значимість.** Її характеризують результати аналізу міцності комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції пілонного типу глибокого закладення.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; скельні породи; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; Новоавстрійський метод спорудження тунелів

Вступ

Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу глибокого закладення, що проводиться на основі чисельного аналізу методом скінченних елементів, є складним завданням навіть для вже відомих конструкцій цієї підземної споруди [3, 6, 10].

Для нової конструкції такого типу станції, що споруджується в міцних породах на основі Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM) і має кардинально іншу структуру, задача проведення чисельного аналізу, який є адекватним реальній ситуації, ускладнюється ще більше [2]. Наявність професійних розрахункових комплексів для чисельного аналізу де-що зменшує складність задачі пошуку напру-

жено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу [1–3].

Задача математичного моделювання, що розв'язується в даній статті, навіть за наявності професійного розрахункового комплексу мала певні передумови. Передумовами чисельного аналізу є відображення реальної конструкції станції метрополітену пілонного типу в математичній моделі максимально повно, а також проведення чисельного аналізу із мінімальною кількістю припущень.

Не викликає ніяких сумнівів те, що постановка задачі, що вирішується в рамках чисельного аналізу, може бути виключно просторовою. Як вже було проаналізовано в роботах [4, 5, 8], слід враховувати просторовий фактор як

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

такий, що має першочергове значення під час формування напружено-деформованого стану. Відповідно, основною передумовою чисельного аналізу є врахування просторовості конструкції під час розробки моделі [9, 11].

Другою передумовою, яка реалізована під час математичного моделювання, є максимально повне відображення в скінченно-елементній моделі розмірів станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM, та властивостей оточуючого масиву, отриманих на основі аналізу інженерно-геологічних умов.

Безсумнівно, що в подальшому чисельному аналізі повною мірою відображено основний принцип геомеханіки, а саме принцип взаємного впливу підземної споруди та оточуючого масиву [7, 12]. Без його втілення в скінченно-елементних моделях станції метрополітену пілонного типу, що максимально тісно взаємодіє зі скельним оточуючим масивом, формуючи загальний напружено-деформований стан, неможливо відобразити особливості NATM, а саме багат шаровість та суцільність оправи.

Однак слід визнати, що не всі особливості цього методу спорудження підземних об'єктів були відображені в скінченно-елементних моделях, однак це не вплинуло негативно на досягнення мети наукової статті, а лише дещо скоригувало отримані результати. Важливим етапом будівництва станції метрополітену пілонного типу, який не був втілений в ході математичного моделювання, є послідовне створення виробки по частинах й закріплення її тимчасовим кріпленням, що складалося не тільки зі сталевих арок й торкрет-бетону товщиною 0,2 м, які в моделі відображені повною мірою. Відповідно, дослідження проводиться виключно в експлуатаційній стадії.

Мета

Метою наукової статті є проведення математичного моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу методом скінченних елементів із пошуком максимальних компонент напружено-деформованого стану й подальшим з'ясуванням міцності комбінованого (тимчасове та постійне) кріплення, яке зводиться на основі Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM).

Методика

Для досягнення поставленої задачі було розроблено скінченно-елементну модель станції метрополітену пілонного типу в професійному розрахунковому комплексі Structure CAD for Windows, version 11.5 (SCAD) [1]. У ній повною мірою відображені властивості комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції метрополітену пілонного типу.

Таким чином, на першому етапі математичного моделювання на основі чисельного аналізу було створено пластинчастий прототип поперечного перерізу кріплення станції метрополітену пілонного типу (рис. 1), в якому відображена система «станційна конструкція – оточуючий масив» з її реальними розмірами та глибиною закладення, що характерна для станції «Центральна» Дніпровського метрополітену.

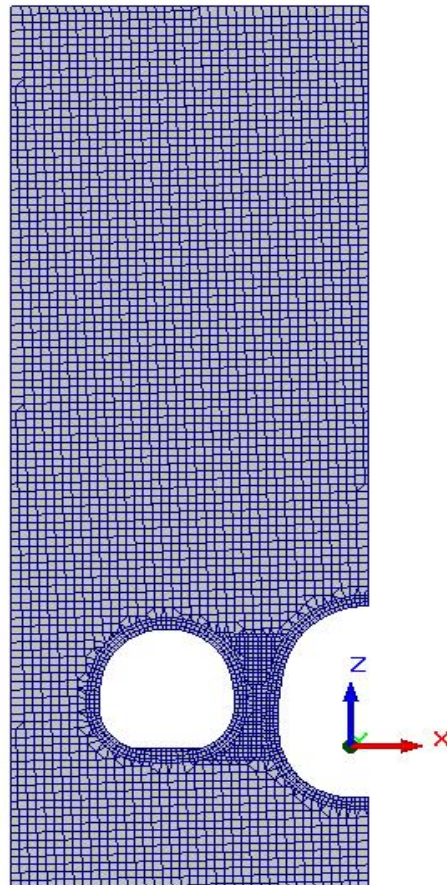


Рис. 1. Пластинчаста модель кріплення станції метрополітену пілонного типу

Fig. 1. Plate model of pylon-type metro station lining

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Остаточно створена пластинчаста модель кріплення станції метрополітену пілонного типу в пілонній частині (кількість вузлів – 4 938, кількість скінченних елементів – 4 780) має розміри: по горизонтальній осі – 20 м, по вертикальній осі – 55,5 м. Прийнята змінна висота скінченного елемента, що знаходиться в межах $0,2 \times 0,2$ м та $0,2 \times 0,25$ м. Близько 90 % моделі (скельний масив, оточуючий станцію метрополітену пілонного типу, й гірський масив до поверхні) складають скінченні елементи розмірами $0,5 \times 0,5$ м.

Змодельований фрагмент станції пілонного типу у 3D-виді (кількість вузлів – 124 320, кількість скінченних елементів – 115 067, завдання характеризується як задача високої розмірності) (рис. 2).

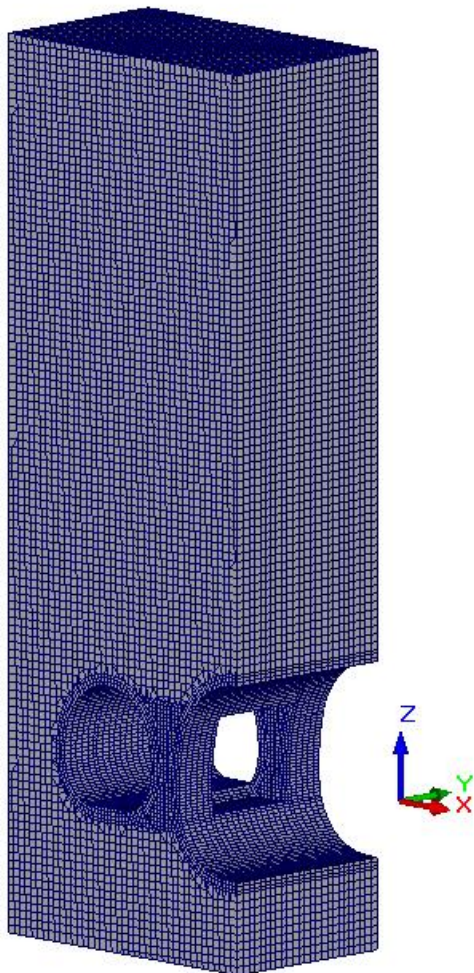


Рис. 2. Просторова модель станції пілонного типу

Fig. 2. Spatial model of a pylon-type station

Після створення моделі, їй надавалися граничні умови. Оскільки змодельована ділянка станції, що повторюється, торцям скінченно-елементної моделі надано граничні умови, що відповідають плоскій деформації (заборона деформування по горизонтальній й поздовжній осям, тобто осям X та Y комплексу SCAD відповідно). Моделювання половини станції метрополітену пілонного типу потребує граничної умови, що відображає симетрію (заборона деформування по горизонтальній осі, тобто осі X SCAD). Аналіз інженерно-геологічних умов свідчить, що станція покоїться на міцній малодеформованій основі (плагіограніт), то слід надати моделі граничні умови, що забороняють переміщення по трьом осям (осі X, Y та Z комплексу SCAD).

Деформаційні характеристики, які присвоювалися тетраедрам і призмам, відповідають матеріалам, що моделюють комбіноване кріплення станції метрополітену пілонного типу, тобто тимчасове товщиною 0,2 м з бетону класу C20/25 з модулем пружності $E_b = 23 \cdot 10^3$ МПа та розрахунковим опором на стиск $R_b = 14,5$ МПа, а також постійне з модулем пружності $E_b = 30,5 \cdot 10^3$ МПа та розрахунковим опором на стиск $R_b = 25,0$ МПа.

Після завдання деформаційних характеристик до моделі кріплення станції пілонного типу були додані навантаження: 1) власна вага постійного та тимчасового кріплення; 2) навантаження від навколишнього ґрунту; 3) тимчасове навантаження.

Результати

Загальний деформований стан для кріплення станції метрополітену пілонного типу завтовшки 0,5 м (постійне кріплення) та 0,2 м (тимчасове кріплення) для двох компонент наведено на рис. 3.

Якісний аналіз деформованого стану загальної моделі демонструє, що представлена геологічна товща має найбільше активне деформування в верхньому шарі осадових порід. Формування горизонтальних переміщень незначне, що пояснюється наявністю під осадовими породами потужного магматичного фундаменту. Вертикальна компонента більш виражена, що характеризується досить високими значеннями переміщень.

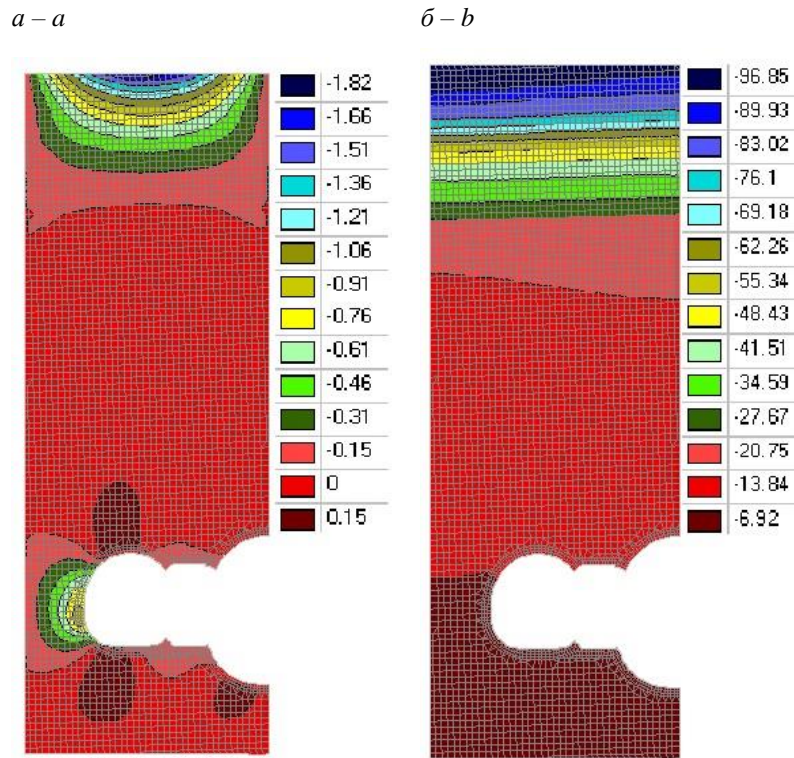


Рис. 3. Горизонтальні (а) та вертикальні (б) переміщення (мм) моделі станції метрополітену пілонного типу у місці проходу

Fig. 3. Horizontal (a) and vertical (b) displacements (mm) of the pylon-type metro station model at the passage location

Після якісного аналізу результатів визначено максимальні значення переміщень: горизонтальні (нижче за горизонтальний діаметр бокового тунелю у місці проходу) – $-1,82$ мм, вертикальні (шелига склепіння середнього тунелю у місці проходу) – $-96,9$ мм. Це значення вертикальних переміщень свідчить про потенційне значне осідання денної поверхні, що потребує запровадження постійного маркшейдерського контролю у межах будівництва станції.

Аналіз вертикальної компоненти деформування для загальної моделі також демонструє те, що у місці проходу й пілонній частині значення мають однаковий порядок. Переміщення середнього та бокового тунелів у місці проходу складає $-13,84$ мм, а в пілонній частині – $-12,58$ мм, а на рівні горизонтального діаметру станційної конструкції відповідно $-6,92$ й $-6,29$ мм. Такі отримані результати свідчать про те, що конструкція станції метрополітену пілонного типу, хоча і є структурою неоднорідною та все ж деформується в досить однорідному стані. Тобто,

значних стрибків вертикальних й горизонтальних переміщень в переході від місця проходу до пілону не спостерігається. Це пояснюється тим, що оправа станції метрополітену пілонного типу, котра складається з тимчасового й постійного кріплення, в повній мірі використовує просторовий фактор. Саме розподіл різних компонент напружено-деформованого стану, що цей фактор дозволяє реалізувати, характеризує конструкцію як таку, що не має непотрібного додаткового підкріплення.

Більш детальний аналіз переміщень оправи довів, що деформування оправи середнього й бокового тунелів, особливо в районі горизонтального діаметру й лоткової частини, підтверджує майже однорідне переміщення станційної конструкції. Наприклад, вертикальні переміщення лоткової частини бокового тунелю складають $-3,05\dots-3,71$ мм (прохід) й $-3,37\dots-3,91$ мм (в місці пілону), а для лоткової частини середнього тунелю відповідно $-1,73$ й $-1,57$ мм. Максимальне значення вертикальних переміщень

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

спостерігається у замку середнього тунелю і складає $-10,3$ мм (у місці проходу). Отримані результати характеризують деформований стан конструкції станції метрополітену пілонного

типу як майже однорідний із значеннями переміщень, що знаходяться в нормативних межах.

Напружений стан кріплення станції пілонного типу наведено для фрагментів конструкції в пілонній частині та місці проходу на рис. 4.

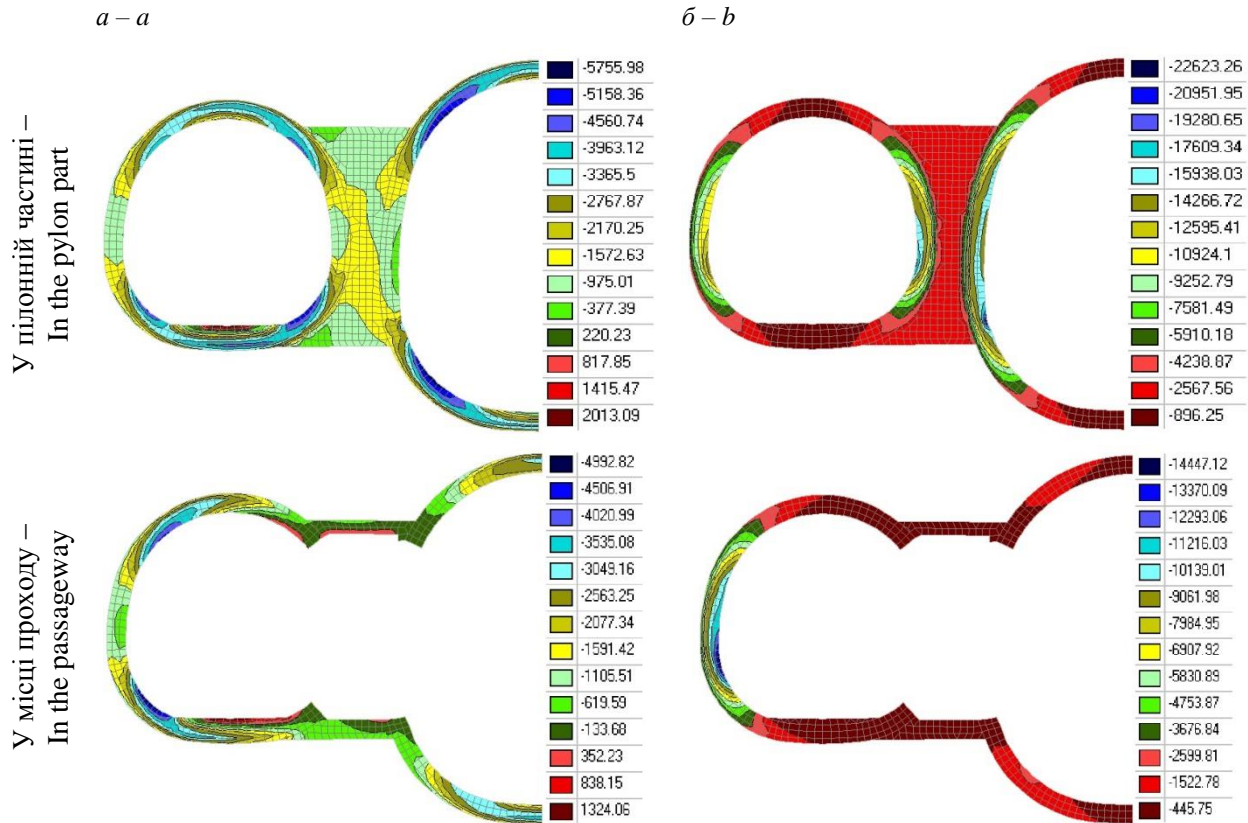


Рис. 4. Горизонтальне (а) й вертикальне (б) нормальне напруження (kN/m^2) у кріпленні станції метрополітену пілонного типу від поєднання навантажень

Fig. 4. Horizontal (a) and vertical (b) normal stress (kN/m^2) in the pylon-type metro station lining from a combination of loads

Якісний аналіз нормальних напружень доводить, що напружений стан конструкції станції метрополітену пілонного типу не є однорідним. Це об'єктивна ситуація, оскільки майже неможливо отримати однорідний напружений стан для структури з вирізами й підкріпленими ділянками. В задачі проектування такого типу станції й не входить забезпечення однорідного напруженого стану конструкції, а виключно забезпечення її міцності.

Однак, констатуючи неоднорідність напруженого стану в станційній конструкції, слід також відмітити, що, наприклад, в боковому тунелі й лотковій частині середнього тунелю роз-

поділ горизонтальної компоненти майже ідентичний, а найбільша неоднорідність як в якісному, так і кількісному плані спостерігається для вертикальної компоненти, в якій жорсткість пілону є вирішальною для формування напруженого стану.

Наявність системи пілонів, а також проходів, що значно впливають на розподіл напружень, формує неоднорідний напружений стан, який в комплексі з однорідним деформованим, представляє визначальну перевагу станційної конструкції такого типу. Найбільш характерним в плані неоднорідності є розподіл дотичних компонент (рис. 5).

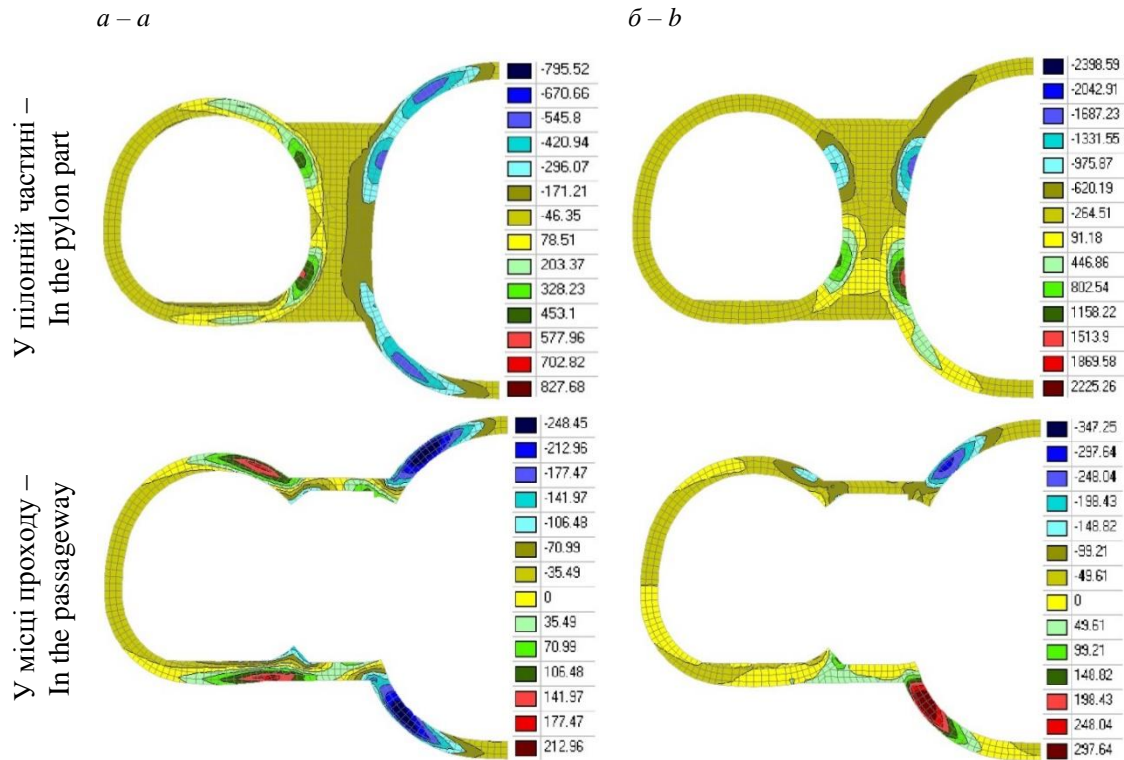


Рис. 5. Дотичні напруження в площині XY (кН/м²) (а) й площині YZ (кН/м²) (б) у кріпленні станції метрополітену пілонного типу від поєднання навантажень

Fig. 5. Tangential stresses in the XY plane (kN/m²) (a) and the YZ plane (kN/m²) (b) in the pylon-type metro station lining from the combination of loads

Якби структура станції метрополітену пілонного типу була б однорідною (будівельна стадія – випадок без проходів, який виникає до їхнього спорудження після закріплення трьох станційних тунелів), то напружений стан також був би однорідним. Наявність проходів, а також діляниць переходу проходу в пілон й навпаки, на прикладі розподілу компонент дотичних напружень свідчить про значний їх перерозподіл.

Концентратори напружень, наприклад, для дотичних напружень в площині YZ (рис. 5, б), збільшуючи значення напружень майже в 7 разів, зміщуються до пілона, який має високу міцність й може сприйняти такі напруження без руйнування. При цьому концентратори, що знаходяться на оправі середнього тунелю, також переміщуються в місце пілону, а концентрація нормальних напружень (див. рис. 4) залишається в місці оправы.

Після аналізу результатів визначено максимальні значення напруження у постійній оправі станції метрополітену пілонного типу: 1) нега-

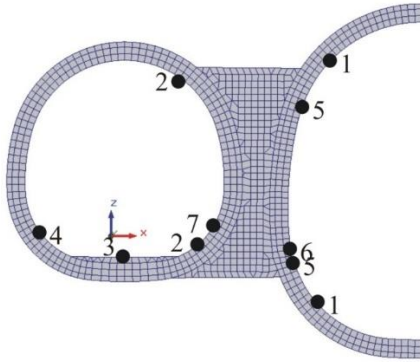
тивні горизонтальні напруження (вісь X, в пілонній частині) – $-5,76$ МПа; позитивне горизонтальне напруження (вісь X, в пілонній частині) – $2,6$ МПа; 2) негативні нормальні напруження (вісь Y, в пілонній частині) – $-8,03$ МПа; позитивне горизонтальне напруження (вісь Y, у місці проходу) – $7,39$ МПа; 3) негативні нормальні напруження (вісь Z, в пілонній частині) – $-27,6$ МПа; позитивне горизонтальне напруження (вісь Z, в пілонній частині) – $0,76$ МПа; 4) дотичні напруження (площина XY, в пілонній частині) – $-0,79$ МПа; дотичні напруження (площина XY, в пілонній частині) – $0,95$ МПа; 5) дотичні напруження (площина XZ, в пілонній частині) – $-6,64$ МПа; дотичні напруження (площина XZ, в пілонній частині) – $6,81$ МПа; 6) дотичні напруження (площина YZ, в пілонній частині) – $-2,39$ МПа; дотичні напруження (площина YZ, в пілонній частині) – $2,58$ МПа.

Однак значення напруженого стану компонентів не є детальним, оскільки в характерних точках можлива взаємодія компонент. Тому

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

проведено розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності (енергетична) у кількох характерних точках (концентраціях) (рис. 6).

a – a



б – б

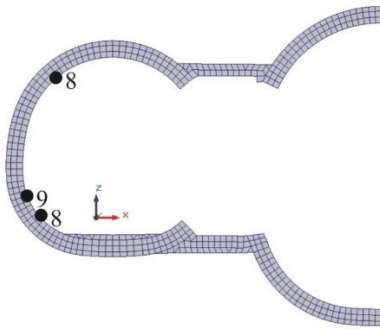


Рис. 6. Схема концентраторів напружень в комбінованому кріпленні станції метрополітену пілонного типу в пілонній частині (а) та місці проходу (б)

Fig. 6. Diagram of stress concentrators in the combined lining of a pylon-type metro station in the pylon part (a) and the passageway (b)

Аналіз розміщення концентраторів напружень свідчить про те, що більшість з них утворені різними компонентами напружень, тобто в кожній точці максимальне значення приймає одне напруження за нормальною або дотичною компонентами. Цей факт знову доводить те, що завдяки просторовому факторові, який утворюється в неоднорідній структурі станції метрополітену пілонного типу, компоненти напружень розосереджуються в елементах комбінованої оправи.

Судячи з наведеної схеми концентраторів напружень, п'ять з них відносяться до комбінованої оправи, яка обрамлює пілон (концентра-

тори в точках 5 (зверху), 5 (знизу), 6, 7 і 2 (знизу)); три точки концентрації напружень спостерігаються на внутрішній поверхні оправи середнього і бокового тунелів, що межують з пілоном (точки 1 (зверху), 1 (знизу) і 2 (зверху)) і п'ять точок концентрації напружень наявні на внутрішній поверхні оправи бокового тунелю (точки 3, 4, 8 (зверху), 8 (знизу) й 9). Слід відмітити, що в концентраторах, що знаходяться в околиці пілону та оправи, що до нього примикає, як буде показано нижче, формування напруженого стану є явно просторовим, з перевалюванням компонент напружень, що виникають в зоні перемички, але передаються на пілон.

Під час кількісного аналізу компонент напруженого стану в концентраторах напружень в точках 5 (зверху), 5 (знизу), 6 й 7 відмічено, що панівною компонентою нормального напруження є саме вертикальне напруження (по осі Z SCAD), яке має значення $-15,9 \dots -20,9$ МПа. При цьому рівень горизонтальної компоненти нормальних напружень (по осі X SCAD) також є достатньо високим ($-5,1 \dots -8,0$ МПа), а дотична компонента напружень є помірною (в діапазоні $-2,0 \dots 1,2$ МПа).

В точках 1 (зверху), 1 (знизу), 2 (зверху) і 2 (знизу), що знаходяться в околиці пілону, напружений стан вже є більш рівномірним, про що свідчать значення нормальних й дотичних напружень. В точках на поверхні бокової оправи 8 (зверху), 8 (знизу) й 9 напружений стан відповідає стиску.

Для вказаних концентраторів напружень за четвертою теорією міцності розраховано еквівалентні напруження в кріпленні станції пілонного типу від поєднання навантажень відповідно до площин XZ та YZ. Аналізуючи еквівалентні напруження, які вже є скалярними величинами і виражають сполучення компонент напружень, що є векторами, слід зважати, що вираз для енергетичної теорії міцності (четвертої) змінювався в залежності від площини.

Окрім цього в подальшому аналізі значень слід додатково враховувати, яка панівна компонента напружень формує еквівалентне напруження і в якій площині, а також межу міцності матеріалу комбінованої оправи. Матеріали тимчасового та постійного кріплення прийняті наступними:

1) тимчасове кріплення:

– торкрет-бетон (товщина 0,2 м, клас бетону С20/25, модуль пружності $E_b = 23 \cdot 10^3$ МПа, розрахунковий опір на стиск $R_b = 14,5$ МПа);

– сталеві дрітця сітка ($2 \times \varnothing 10/150$ мм, двошарова, клас А400С, характерна межа текучості – 4 000 МПа, розрахункова межа текучості – 3 636,4 МПа);

– ґратчасті балки (клас А400С, характерна межа текучості – 4 000 МПа, розрахункова межа текучості – 3 636,4 МПа);

2) постійне кріплення:

– торкрет-бетон (товщина 0,5 м, клас бетону С35/45, модуль пружності $E_b = 30,5 \cdot 10^3$ МПа, розрахунковий опір на стиск $R_b = 25,0$ МПа);

– арматура (клас А400С, характерна межа текучості – 4 000 МПа, розрахункова межа текучості – 3 636,4 МПа).

Судячи із форм та площі концентраторів напружень, представлених на рис. 6, вони не зачіпають тимчасове кріплення, знаходячись виключно в постійній оправі. Відповідно, в якості межі міцності матеріалу, у ролі якої виступає розрахунковий опір стиску бетону R_b , прийнято торкрет-бетон з класом С35/45 й розрахунковим опором на стиск $R_b = 25,0$ МПа.

Запас міцності, який розраховано виключно за торкрет-бетоном постійної (за тріщинуватістю), перебуває у межах 9,0...1,2, а точці 6 дорівнює одиниці (еквівалентне напруження дорівнює 24,4 МПа), а в точці 5 – 1,2 (еквівалентне напруження дорівнює 21,2 МПа). У цих точках, як вже було пояснено вище, проявляється концентрація напружень через те, що прохід був змодельований у вигляді не овоїдної, а прямокутної конструкції. Однак, враховуючи особливості скінченно-елементної моделі і аналізуючи разом із еквівалентним напруженням окремі компоненти напружень, слід відмітити, що в точках 5 (зверху і знизу) і 6 напруження стиску є високим (нормальна вертикальна компонента знаходиться в діапазоні –15,9...–20,9 МПа).

Судячи з значень запасу міцності, отриманих після розрахунку еквівалентних напружень, конструкція постійної оправі має достатню міцність для подальшої нормальної експлуатації. При цьому слід рекомендувати додаткове армування в зоні концентраторів на внутрішній поверхні постійної оправі середнього тунелю (точки 5 (зверху і знизу), 6 і 7) для збільшення коефіцієнту запасу й локальної міцності.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна результатів полягає у вперше отриманих в ході математичного моделювання результатах напружено-деформованого стану станції пілонного типу, що споруджується в міцних породах на основі NATM. Практичну значимість досліджень характеризують результати аналізу міцності комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції пілонного типу глибокого закладення.

Висновки

У статті проаналізовані передумови математичного моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу. В розробленій просторовій моделі відображені властивості кріплення станції метрополітену пілонного типу й особливості станційної конструкції, такі як просторовий фактор, система «пілон – прохід» та взаємодія між елементами конструкції та оточуючим скельним масивом.

Під час чисельного аналізу отримано репрезентативну інформацію щодо напружено-деформованого стану станції метрополітену пілонного типу і з'ясовано, що наявність проходів, а також діляниць переходу проходу в пілон й навпаки, свідчить про значний їх перерозподіл, причому концентратори зміщуються до пілона, який має високу міцність й може прийняти такі напруження без руйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2020. 260 с.
2. Федоров К. Є., Тютюкін О. Л. Критичний аналіз методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520>

3. Ding D. Y., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Yan M., Li A. M. Numerical Analysis of Metro Station Construction by Large-Diameter Shield and Pile-Beam-Arch Method. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 368–373. P. 2711–2715. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711>
4. Do N. A., Dias D. A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*. 2017. Vol. 76. 102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z>
5. Fung I. W., Wang J. A., Au A. S., Zhou Y. F. Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *International Symposium on Nonlinear Dynamics (2007 ISND). Journal of Physics : Conference Series* (Shanghai, China, 27–30 October 2007). Bristol : IOP Publishing, 2008. Vol. 96. 012121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121>
6. Jin D., Yuan D., Liu S., Li X., Luo W. Performance of Existing Subway Tunnels Undercrossed by Four Closely Spaced Shield Tunnels. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2019. Vol. 33, Iss. 1. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001230)
7. Li Y., Jin X., Lv Z., Dong J., Guo J. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 56. P. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016>
8. Svoboda T., Masin D. Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*. 2011. Vol. 34, Iss. 2. P. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.1002/gete.201000009>
9. Yan M., Ding D. Y., Yang X. R., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Li A. M. 3D Numerical Analysis of Metro Station by PBA Method to Enlarge Existing Large-Size Shield Tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 170–173. P. 1673–1678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673>
10. Yanjuan H., Dingli Z., Ran L., Xu C., Weiwei Q. Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024. Vol. 56, Iss. 11. P. 3213–3226. DOI: <http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015>
11. Zhang J.-L., Liu X., Zhao J.-B., Yuan Y., Mang H. Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111. 103795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795>
12. Zhou M., Chen J., Huang H., Zhang D., Zhao S., Shadabfar M. Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 147. 104914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914>

K. Ye. FEDOROV¹, O. L. TIUTKIN^{2*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 353 29 33, e-mail kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

^{2*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

Mathematical Modeling of the Pylon-Type Metro Station Design Based on Numerical Analysis

Purpose. The authors set the goal of conducting mathematical modeling of the pylon-type metro station structure based on numerical analysis using the finite element method, as well as searching for components of the stress-strain state and determining the strength of the combined reinforcement, which is constructed based on the New Austrian tunneling method. **Methodology.** To achieve the task, a finite element model of a pylon-type metro station was developed in the professional calculation complex Structure CAD for Windows. The model fully reflects the properties of the combined (temporary and permanent) lining of a pylon-type metro station. Half of the pylon-type metro station was modeled; the model was given deformation characteristics taken from real engineering and geological studies. Also, a set of boundary conditions was applied to the model, which corresponds to the real deformation of the system, as well as the combination of loads. **Findings.** During the numerical analysis, representative information was obtained on the stress-strain state of the pylon-type metro station and it was found that the presence of passages, as well as sections of the passage transition into the pylon and vice versa, indicates their significant redistribution. A detailed analysis of the frame displacements proved that the deformation of the frame of the middle

and side tunnels confirms the almost uniform movement of the station structure. The maximum values of stresses in the permanent frame of the pylon-type metro station were determined. The presence of a system of pylons, as well as passages, forms a non-uniform stress state, which, in combination with a uniform deformed state, represents a defining advantage of the station structure of this type. **Originality** of the results lies in the first obtained during mathematical modeling of the stress-strain state of the structure of a pylon-type station, which is being built in strong soils based on NATM. **Practical value.** It is characterized by the results of the analysis of the strength of the combined (temporary and permanent) lining of a deep-buried pylon-type station.

Keywords: metro; pylon-type station; rock formations; stress-strain state; finite element method; New Austrian tunneling method

REFERENCES

1. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii: monohrafiia*. Dnipro: Zhurfond (in Ukrainian)
2. Fedorov, K. Ye., & Tiutkin, O. L. (2024). Critical Analysis of Methods for Calculating the Stress-Strain State of the Pylon-Type Metro Station Structure. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 26, 104-112. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520> (in Ukrainian)
3. Ding, D. Y., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., Yan, M., & Li, A. M. (2012). Numerical Analysis of Metro Station Construction by Large-Diameter Shield and Pile-Beam-Arch Method. *Advanced Materials Research*, 368-373, 2711-2715. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711> (in English)
4. Do, N. A., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z> (in English)
5. Fung, I. W. H., Wang, J. A., Au, A. S. K., & Zhou, Y. F. (2008). Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *Journal of Physics: Conference Series*, 96, 012121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121> (in English)
6. Jin, D., Yuan, D., Liu, S., Li, X., & Luo, W. (2019). Performance of Existing Subway Tunnels Undercrossed by Four Closely Spaced Shield Tunnels. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(1). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001230](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001230) (in English)
7. Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 22-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016> (in English)
8. Svoboda, T., & Masin, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2), 115-126. DOI: <https://doi.org/10.1002/gete.201000009> (in English)
9. Yan, M., Ding, D. Y., Yang, X. R., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., & Li, A. M. (2012). 3D Numerical Analysis of Metro Station by PBA Method to Enlarge Existing Large-Size Shield Tunnel. *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, 1673-1678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673> (in English)
10. Yanjuan, H., Dingli, Z., Ran, L., Xu, C., & Weiwei, Q. (2024). Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 56(11), 3213-3226. DOI: <http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015> (in English)
11. Zhang, J. L., Liu, X., Zhao, J. B., Yuan, Y., & Mang, H. (2021). Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795> (in English)
12. Zhou, M., Chen, J., Huang, H., Zhang, D., Zhao, S., & Shadabfar, M. (2021). Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914> (in English)

Надійшла до редколегії: 01.08.2025

Прийнята до друку: 17.12.2025

УДК 311:[69-043.86:338.45]

І. Д. ШОНІЯ^{1*}, С. М. ОЛЬХОВИК^{2*}

^{1*}Каф. організації і управління будівництвом, Українського державного університету науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.+38 (063) 410 63 81, ел. пошта shoniayirakliy@gmail.com, ORCID 0009-0001-8325-377X

^{2*}Каф. організації і управління будівництвом, Українського державного університету науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.+38 (097) 431 94 24, ел. пошта serge.olkhoviyk@gmail.com, ORCID 0009-0000-8578-1579

Статистичний аналіз розвитку будівельної галузі України у 2020–2024 роках та організаційно-технологічні висновки

Мета. Надати цілісну й зрозумілу оцінку змін у будівельній галузі України в кризовий період, показати, як вони вплинули на обсяги робіт, структуру попиту, ринок праці та фінансові результати підприємств і сформулювати практичні висновки для організації відбудови. **Методика.** Застосовано поєднання загальнонаукових підходів із прозорими статистичними процедурами. Порівняння виконано на гармонізованій основі зі сталою територіальною базою, без урахування тимчасово окупованих територій та зон бойових дій. Використано індекси на фіксованій базі та покрокові індекси для відстеження динаміки, структурний аналіз часток за видами будівельної продукції, а також декомпозицію внесків окремих підгалузей у зміну загальних показників. Проведено перевірку чутливості щодо вибору базового періоду й переваг, а також логічну крос-перевірку підсумків. **Результати.** Встановлено послідовність спадної фази, етапу адаптації та поступового відновлення. Зафіксовано стійкий зсув попиту від житлового сегмента до інженерної інфраструктури та промислових об'єктів. Показано посилення ролі малих і мікропідприємств у зайнятості поряд із помітною різницею у фінансових результатах між видами діяльності та розмірними групами. Підкреслено залежність від публічних програм і важливість прозорого управління строками, вартістю та логістикою. **Наукова новизна.** Запропоновано просту й водночас строгішу аналітичну рамку, що дозволяє відокремити органічне відновлення від статистичних ефектів бази та змін охоплення. Уточнено природу структурних зрушень, сформовано кількісні оцінки внесків підгалузей, обґрунтовано використання сталої територіальної основи для коректного міжчасового зіставлення. **Практична значимість.** Результати придатні для пріоритизації проектів відбудови критичної інфраструктури, реалістичного планування ресурсів і ланцюгів постачання, а також для налаштування контрактних моделей з підсиленням контролем ризиків і вартості. Особливо обґрунтовано розгортання інформаційного моделювання будівель із часовим і вартісним виміром, застосування модульних та індустріалізованих рішень, гнучких схем субпідряду й цифрового моніторингу, що підвищують керованість і узгодженість дій учасників у змінному середовищі.

Ключові слова: будівельна галузь; обсяги виробництва; динаміка 2020–2024; індекси будівельної продукції; інженерні споруди; нежитлове будівництво; ВІМ-технології; післявоєнне відновлення; логістика будівництва; організаційно-технологічні висновки

Вступ

Упродовж 2020–2024 рр. будівельна галузь України розвивалася в умовах безпрецедентної турбулентності, зумовленої послідовним впливом двох системних шоків – пандемії COVID-19 та повномасштабної війни, що розпочалася у лютому 2022 р. Пандемія спричинила різке звуження платоспроможного попиту домогосподарств і бізнесу, уповільнення, а подекуди повне призупинення інвестиційних програм, порушення ланцюгів постачання та зростання макроекономічної невизначеності [7]. Це безпосередньо позначилося на ключових галузе-

вих показниках, погіршивши динаміку виробленої будівельної продукції вже за підсумками 2020 р.

З початком повномасштабної війни шок посилювався: з'явилися значні фізичні та інституційні обмеження для реалізації інвестиційно-будівельних проектів, зросли ризики безпеки, посилювалися логістичні бар'єри й дефіцити ресурсів, на окремих територіях відбулася фактична зупинка робіт. Це зумовило глибоку рецесію в секторі та поставило під загрозу безперервність виконання багатьох проектів, особливо у регіонах, безпосередньо охоплених бойовими діями [10, 11].

В умовах високої невизначеності довгострокове прогнозування тривалості кризи та її наслідків для галузі ускладнене. Водночас підприємства вимушені адаптуватися до екстремальних обставин, мобілізуючи внутрішні резерви, впроваджуючи антикризові підходи до управління, підтримуючи кадровий потенціал та гнучко адаптуючи виробничі процеси. Звідси випливає науково-практична проблема: потреба в узгодженій, статистично обґрунтованій оцінці динаміки, тенденцій і структурних зрушень будівельної галузі у 2020–2024 рр. як основи для обґрунтованих управлінських рішень, пріоритизації відбудови, оптимізації ресурсного планування та зниження проєктних ризиків.

Проблематика оцінювання сучасного стану й тенденцій розвитку будівельної галузі України висвітлена у працях низки вітчизняних дослідників, зокрема В. І. Кривдика, С. А. Матюха та ін. У цих публікаціях розглянуто макроекономічні детермінанти динаміки галузі, інвестиційну активність, інституційні чинники та особливості регуляторного середовища й використовуються інструменти структурно-динамічного та порівняльного аналізу на базі офіційної статистики. Однак, більшість робіт зосереджені переважно на довоєнному зрізі або коротких часових інтервалах до 2022 року, що знижує достовірність їхніх висновків в умовах післякризової трансформації галузі [2].

Різка зміна операційного середовища після 2020 року (пандемічні обмеження) та з лютого 2022 року (повномасштабна війна) зумовила появу нових системних ризиків і зрушень у структурі попиту на будівельну продукцію. Окремі аналітичні матеріали фіксують акцент на відбудові критичної інфраструктури та переорієнтацію інвестицій, проте у науковому дискурсі поки що бракує узгоджених емпіричних досліджень, які б у єдиній методичній рамці охоплювали період 2020–2024 рр. та одночасно враховували:

- обсяги і структуру виробленої будівельної продукції;
- ринкову зайнятість за розміром підприємств;
- фінансові результати до оподаткування, із підтвердженням надійності джерел та узгодженням одиниць виміру.

Таким чином, наявний науковий внесок сформував корисне підґрунтя для розуміння

довоєнних трендів, однак залишає відкритою потребу в оновленому комплексному статистичному аналізі 2020–2024 рр. з перехресною перевіркою показників і відтворюваною методикою. Заповнення цієї прогалини дозволить уточнити масштаби структурного зсуву на користь інженерних споруд, кількісно описати нову конфігурацію ринку праці та окреслити межі фінансової стійкості галузевих сегментів у контексті програм повоєнної відбудови [1-3].

Мета

Мета дослідження – здійснити комплексну, статистично обґрунтовану оцінку динаміки та структурних зрушень у будівельній галузі України у 2020–2024 рр. під кумулятивним впливом пандемії COVID-19 та повномасштабної війни, з акцентом на трансформацію попиту й пропозиції у сегментах галузі.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Кількісно охарактеризувати динаміку обсягів виробленої будівельної продукції за 2020–2024 рр. (індекси до попереднього року, середньорічні темпи зміни).
2. Оцінити структурні зсуви між житловим, нежитловим будівництвом та інженерними спорудами (частки у підсумку року; внески підгалузеві у приріст/падіння).
3. Проаналізувати ринок праці за розміром підприємств (великі, середні, малі; з них – мікро) та зафіксувати зміни у структурі зайнятості.
4. Дослідити фінансові результати до оподаткування за видами діяльності та розмірами підприємств; ідентифікувати ознаки поляризації прибутків/збитків.
5. Синтезувати організаційно-технологічні висновки для управління проєктами відбудови: визначення пріоритетів інженерної інфраструктури, оптимізація логістики й ресурсів, вибір гнучких контрактних моделей, інтеграція BIM-підходів (4D/5D) для планування строків і вартості.

Практична цінність полягає у можливості застосування отриманих результатів для підвищення ефективності планування, управління ризиками та ресурсами у програмах повоєнної відбудови, а також у реалізації проєктів нового будівництва, реконструкції та модернізації в умовах обмежень і високої невизначеності.

Методика

Дослідження виконано на основі офіційних масивів даних Державної служби статистики України щодо:

- обсягів виробленої будівельної продукції за видами (2019–2024);
- чисельності найманих працівників за видами діяльності з розподілом за розмірами підприємств (2019–2024);
- фінансових результатів до оподаткування за видами діяльності й розмірами підприємств (2024).

Для коректності міжчасових зіставлень застосовано гармонізовану територіальну основу, тобто дані наведено без урахування тимчасово окупованих територій і зон бойових дій у періоди, коли вони не покриваються офіційною звітністю.

Аналітичний інструментарій включає:

- індекси до попереднього року та на фіксованій базі – для динаміки;
- структурний аналіз часток основних сегментів (житлові, нежитлові будівлі, інженерні споруди) – для виявлення зсувів;
- декомпозицію внесків підсекторів у приріст/падіння загального показника – для ідентифікації драйверів;
- перевірки чутливості до вибору базового року/ваг і крос-перевірку підсумків між таблицями та офіційними підсумками.

Обмеження: позначки «к/с» (конфіденційно) у підтабличних розрізах не інтерпретуються, а річні показники округлюються до одного-двох знаків після коми з можливими невеликими розбіжностями в загальній сумі.

Результати

Динаміка випуску. Будівельна галузь належить до провідних, структуроутворюючих секторів національного господарства: її стабільне функціонування забезпечує інфраструктурний розвиток держави та підтримує значну зайнятість.

Аналіз офіційних статистичних даних за 2020–2024 рр. фіксує високу турбулентність і різноспрямованість динаміки.

Виявлено два глибокі рецесійні провали – у 2020 р. (наслідки пандемічних обмежень) та

у 2022 р. (початок повномасштабної війни). Починаючи з 2023 р., спостерігається фаза поступового відновлення: індекс обсягу виробленої будівельної продукції становив $\approx 144\%$ у 2023/2022 та $\approx 127\%$ у 2024/2023 (до попереднього року). Позитивний імпульс передусім зумовлений активізацією програм відбудови критичної інфраструктури, відновленням транспортно-логістичних сполучень і релокацією (або модернізацією) промислових об'єктів.

Структура випуску зазнала суттєвого зсуву. Станом на 2024 р. домінують інженерні споруди: їхня частка у підсумку галузі становила $\approx 58\%$, тоді як нежитлові будівлі – $\approx 29\%$, а житлові – $\approx 13\%$. Це відображає вимушену переорієнтацію інвестицій з житлового сегмента на користь стратегічних інфраструктурних та промислово-виробничих проєктів, критично важливих для економічної стійкості [3].

Для деталізації зазначених зрушень у табл. 1 систематизовано зведені дані щодо обсягів виробленої будівельної продукції за основними видами у 2020–2024 рр., із відображенням річних індексів та часток у підсумку.

Втім зведені дані маскують суттєві внутрішні структурні зрушення. Для їхнього розкриття у табл. 2 наведено деталізацію за підвидами будівельної діяльності: житлові та нежитлові будівлі, а також підгрупи інженерних споруд (зокрема транспортна інфраструктура, трубопроводи, лінії електронних комунікацій та електропередачі тощо) із відповідними темпами зміни.

Аналіз даних табл. 2 показує, що будівельна галузь України після шокового падіння 2022 р. перейшла у фазу поступового відновлення.

Будівлі. У 2021 р. обсяг зріс на 27,6% (до 2020 р.), у 2022 р. відбувся спад на 51,2%, у 2023 р. – відновлення на 30,6%, а у 2024 р. зростання закріпилося ще на 33,7%. Така траєкторія відображає чутливість сегмента до приватних інвестицій та платоспроможності домогосподарств, що відновлюються повільніше, ніж бюджетне фінансування.

Інженерні споруди. Після приросту 27,8% у 2021 р., сегмент зазнав падіння на понад 58% у 2022 р., проте у 2023 р. продемонстрував різке відновлення +54,9%, а у 2024 р. зростання зберіглося на рівні +22,2%. Це узгоджується з пріоритетом відновлення критичної інфраструктури.

Таблиця 1

Обсяги виробленої будівельної продукції за видами у 2020–2024 роках, млн. грн*

Table 1

Volumes of construction output by type in 2020–2024, million UAH*

	Будівництво, усього	Будівлі	У тому числі		Інженерні споруди	Темп зміни загального будівництва, % до попереднього року**	Частка будівель, %**	Частка інженерних споруд, %**
			Житлові будинки	Нежитлові будівлі				
2020	202 080,8	80 625,6	29 083,6	51 542,0	121 455,2	–	39,9	60,1
2021	258 073,6	102 894,3	39 147,9	63 746,4	155 179,3	127,7	39,9	60,1
2022	114 943,8	50 172,5	20 072,2	30 100,3	64 771,3	44,5	43,6	56,4
2023	165 818,2	65 511,5	22 906,6	42 604,9	100 306,7	144,3	39,5	60,5
2024	210 197,4	87 605,9	27 445,8	60 160,1	122 591,5	126,7	41,7	58,3

¹ Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії.

* Сформовано автором за даними [3]

** Розраховано автором

Таблиця 2

Динаміка обсягів виробленої будівельної продукції за підвидами у 2020–2024 роках, млн. грн*

Table 2

Dynamics of construction output by sub-type in 2020–2024, million UAH*

	Роки					Темп зміни, %**			
	2020	2021	2022	2023	2024	2021/	2022/	2023/	2024/
						2020	2021	2022	2023
Будівництво	202 080,8	258 073,6	114 943,8	165 818,2	210 197,4	127,71	44,54	144,26	126,76
Будівлі:	80 625,6	102 894,3	50 172,5	65 511,5	87 605,9	127,62	48,76	130,57	133,73
– житлові будинки	29 083,6	39 147,9	20 072,2	22 906,6	27 445,8	134,60	51,27	114,12	119,82
– нежитлові будівлі	51 542,0	63 746,4	30 100,3	42 604,9	60 160,1	123,68	47,22	141,54	141,20
з них:									
– будівлі транспорту та зв'язку	769,6	668,8	536,9	605,0	343,8	86,90	80,28	112,68	56,83
– промислові та складські будівлі	15 971,8	19 848,4	10 249,0	12 570,6	17 784,8	124,27	51,64	122,65	141,48
Інженерні споруди:	121 455,2	155 179,3	64 771,3	100 306,7	122 591,5	127,77	41,74	154,86	122,22
– транспортна інфраструктура	67 857,8	90 093,0	23 773,1	37 957,4	27 014,4	132,77	26,39	159,67	71,17
– автомобільні дороги загального користування, вулиці та інші дороги	62 126,8	83 957,3	17 062,4	25 356,4	17 493,2	135,14	20,32	148,61	68,99
– залізниці	1 890,8	1 729,1	1 357,2	1 063,7	1 661,7	91,45	78,49	78,37	156,22

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження таблиці 2

Continuation of Table 2

	Роки					Темп зміни, %**			
	2020	2021	2022	2023	2024	2021/ 2020	2022/ 2021	2023/ 2022	2024/ 2023
	– злітно-посадкові смуги	429,0	680,9	к/с	к/с	–	158,72	–	–
– мости, естакади, тунелі та метро	2 295,5	2 729,8	5 206,8	8 429,2	7 570,9	118,92	190,74	161,89	89,82
– портові споруди, канали, дамби та інші водні споруди	1 115,7	995,9	к/с	к/с	288,6	89,26	–	–	–
– трубопроводи, лінії електронних комунікаційних мереж та електропередачі	21 945,0	26 804,7	15 626,9	22 687,3	27 563,3	122,14	58,30	145,18	121,49
– магістральні трубопроводи, лінії електронних комунікаційних мереж та електропередачі	10 058,6	12 428,8	7 367,9	11 820,9	12 542,0	123,56	59,28	160,44	106,10
– місцеві трубопроводи, лінії електронних комунікаційних мереж та електропередачі	11 886,4	14 375,9	8 259,0	10 866,4	15 021,3	120,94	57,45	131,57	138,24
– комплексні споруди промислових об'єктів:	25 333,1	30 746,3	22 665,0	35 473,5	43 241,9	121,37	73,72	156,51	121,90
– споруди гірничодобувні	14 008,7	17 309,1	14 831,6	26 024,1	26 279,9	123,56	85,69	175,46	100,98
– споруди електростанцій	7 532,9	8 982,8	5 810,8	7 420,9	14 278,4	119,25	64,69	127,71	192,41
– споруди підприємств хімічної промисловості	342,4	377,1	392,4	525,1	622,7	110,13	104,06	133,82	118,59
– споруди важкої промисловості, не класифіковані раніше	3 449,1	4 077,3	1 630,2	1 503,4	2 060,9	118,21	39,98	92,22	137,08
– інші інженерні споруди:	6 319,3	7 535,3	2 706,3	4 188,5	24 771,9	119,24	35,91	154,77	591,43
– спортивні та рекреаційні споруди	1 856,3	2945,1	260,1	276,5	477,2	158,65	8,83	106,31	172,59

¹ Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії.

* Сформовано автором за даними [3]

** Розраховано автором

к/с – конфіденційно; дані не оприлюднюються

Лідери зростання у 2024 р. (до 2023 р.) за підвидами:

- інші інженерні споруди – +591 %;
- споруди електростанцій – +192 %;
- комплексні промислові об'єкти – +122 %;
- трубопроводи, лінії електронних комунікацій та електропередачі – +121 %.

Такі надвисокі темпи свідчать не лише про «ринкове пожвавлення», а радше про цільове визначення пріоритетів відбудови (енергетика, комунікації, промислово-виробнича інфраструктура) та ефект низької бази 2023 р. у частині підвидів. Структура попиту у 2023–2024 рр. формувалася переважно під впливом держав-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

них і міжнародних програм фінансування відновлення, що зумовлює зміщення портфеля замовлень у бік великих інфраструктурних проєктів і висуває підвищені вимоги до кваліфікації підрядників, прозорості процедур і контролю використання коштів.

Порівняння з довоєнним періодом. Для повноти аналізу доцільно зіставити поточні тенденції 2020–2024 рр. із довоєнною динамікою. За даними Держстату та узагальненнями, наведеними у статті Кривдика й Матюха (2020), у 2015–2019 рр. будівельна галузь України демонструвала стійке зростання:

– у 2019 р. обсяг виробленої будівельної продукції становив 181,7 млрд грн, що приблизно у 3,2 рази перевищило рівень 2015 р.;

– річні темпи приросту у низці напрямів сягали 25–40 %, а в окремих видах діяльності (передусім у нежитловому будівництві та комплексних промислових спорудах) фіксувалися пікові значення до +150 % за рік;

– у структурі 2019 р. домінували ринково орієнтовані сегменти: нежитлові будівлі – 27,7 %, комплексні промислові споруди – 20,2 %, транспортні об'єкти – 18,5 %, житлові будинки – 18,3 %; частка «інших інженерних споруд» становила близько 4 % [3].

На тлі відносно рівномірного підйому 2015–2019 рр. період 2020–2024 рр. характеризується різко вищою волатильністю: двома спадними фазами (пандемічний шок 2020 р. та воєнний шок 2022 р.) і відновлювальною траєкторією 2023–2024 рр. Особливо показовою є підгрупа

«інші інженерні споруди»: за низької бази попереднього року у 2024 р. зафіксовано +591 % (до 2023 р.), що відображає мобілізаційний характер попиту на відбудову критичної інфраструктури та об'єктів енергетики.

Отримані зіставлення підтверджують структурну переорієнтацію інвестицій із житлового сегмента на інфраструктурні та промислово-виробничі об'єкти – типовий маркер економіки воєнного часу, а не класичного ринкового циклу зростання. Відповідно, якщо у 2015–2019 рр. розвиток галузі зумовлювався приростом приватних інвестицій за умов стабільнішого попиту, то у 2020–2024 рр. формується кризово-відновлювальна траєкторія, де провідну роль відіграють інженерні споруди та промислові комплекси, що фінансуються переважно за рахунок державних і донорських програм, тоді як приватне житлове будівництво тимчасово відходить на другий план.

Зазначені відмінності доцільно ілюструвати на рис. 1, який відображає динаміку загального будівництва, будівель та інженерних споруд у 2020–2024 рр.

З прикладної позиції порівняння періодів фіксує зміну пріоритетів замовлень: від житлових будівельних циклів – до інфраструктурних та промислово-виробничих контрактів із підвищеними вимогами до проектування, логістики та прозорості. Очікується, що житловий сегмент відновлюватиметься повільніше й залежатиме від іпотечних програм, міграційної динаміки та стабілізації доходів домогосподарств.

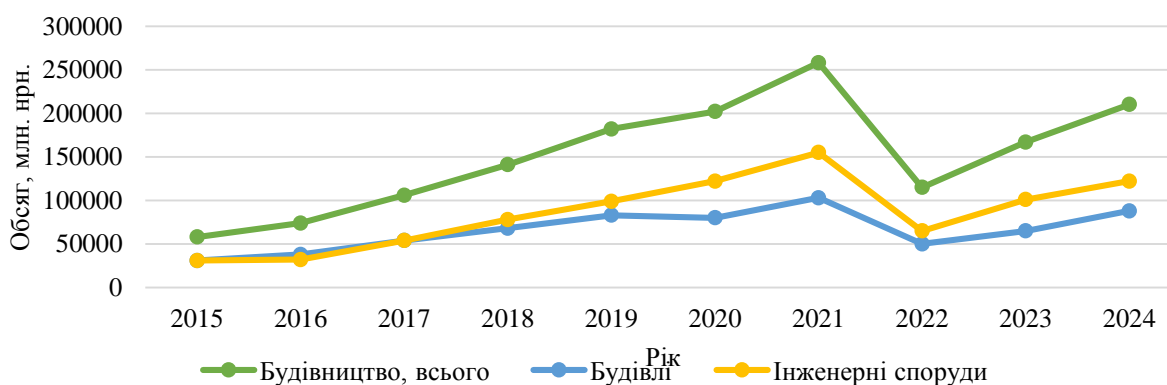


Рис. 1. Динаміка обсягів будівельної продукції України (2015–2024 рр.)

¹ Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії. Побудовано за даними [3], зіставлення довоєнних значень – за [2]

Fig. 1. Dynamics of construction output in Ukraine (2015–2024)

¹ Data exclude territories temporarily occupied by the russian federation and parts of territories where hostilities are (were) ongoing. Based on data from [3], comparison of pre-war values – according to [2]

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Починаючи з 2023 р., загальне будівництво, будівлі та інженерні споруди демонструють стаке відновлення; водночас інженерні споруди зростають швидше, ніж будівлі. Це розходження темпів підтверджує раніше окреслену переорієнтацію інвестицій із приватного житлового сегмента на інфраструктурне та промислове будівництво. Структурний розподіл обсягів виробленої будівельної продукції у 2024 р. засвідчує домінування інженерних споруд ($\approx 58\%$). Нежитлові будівлі формують близько 29 %, тоді як житлові – орієнтовно 13 %.

Такі пропорції узгоджуються з попереднім аналізом і відображають стійку переорієнтацію ринку: від більшої питомої ваги приватного житлового будівництва у 2019 р. до переваги інфраструктурних проєктів у 2024 р.

Ринок праці. Аналіз кадрового забезпечення будівельної галузі (див. табл. 3) засвідчує вплив двох зовнішніх шоків (пандемії 2020 р. та повномасштабної війни з лютого 2022 р.) на чисельність найманих працівників і структуру зайнятості [7, 9].

За офіційною статистикою, сформованою на чинному для відповідних періодів територіальному охопленні (без тимчасово окупованих територій та зон бойових дій), середньооблікова чисельність найманих працівників зменшилася з 301,4 тис. осіб у 2021 р. до 224,9 тис. у 2022 р. ($\approx -25,4\%$ р/р). У 2023–2024 рр. фіксується по-

вільне відновлення; станом на 2024 р. показник становить лише $\approx 197,0$ тис. осіб. Порівняння з довоєнним 2019 р. (285,6 тис.) слід трактувати як індикативне через відмінності територіального охоплення; відповідно агрегована оцінка « $\approx -31\%$ за 2019–2024 рр.» не інтерпретується як жорстке міжчасове зіставлення рівнів і потребує гармонізації за сталою територіальною базою [1].

Галузевий ринок праці характеризується сталим домінуванням малих суб'єктів і зростанням ролі мікробізнесу:

– малі підприємства – 58,7 % зайнятості у 2024 р. (проти 56,5 % у 2019 р.);

– мікропідприємства – 25,4 % у 2024 р. (проти 21,4 % у 2019 р.);

– середні – 35,6 % у 2024 р. (проти 40,3 % у 2019 р.);

– великі – 5,7 % у 2024 р. (проти 3,2 % у 2019 р.) [1].

Ці зрушення вказують на фрагментацію ринку праці та перерозподіл зайнятості на користь менших роботодавців, що узгоджується з практикою субпідряду, мобільних бригад і гнучких виробничих конфігурацій у період відбудови. Водночас скорочення загальної чисельності персоналу утримує галузь нижче довоєнних рівнів, підвищує чутливість до кадрових ризиків і посилює вимоги до підготовки та утримання кваліфікованих кадрів.

Таблиця 3

Кількість найманих працівників у будівництві за розмірами підприємств у 2019–2024 рр.

Table 3

Number of employees in construction by enterprise size in 2019–2024

Рік	Усього, осіб	Великі, осіб	Великі, %	Середні, осіб	Середні, %	Малі, осіб	Малі, %	з них мікро, осіб	з них мікро, %
2019	285 647	9 110	3,2	115 138	40,3	161 399	56,5	61 078	21,4
2020	282 799	12 400	4,4	111 247	39,3	159 152	56,3	60 865	21,5
2021	301 416	22 398	7,4	115 806	38,4	163 212	54,2	64 562	21,4
2022	224 937	9 517	4,2	90 435	40,2	124 985	55,6	48 758	21,7
2023	197 662	9 388	4,7	72 055	36,5	116 219	58,8	49 143	24,9
2024	196 983	11 276	5,7	70 080	35,6	115 627	58,7	50 050	25,4

¹ Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії. Сформовано автором за даними [1]

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Фінансові результати. Фінансові підсумки 2024 р., зазначені у табл. 4, засвідчують поляризацію результатів у будівельній галузі: сукупний фінансовий результат до оподаткування є прибутковим, але формується на тлі суттєвих розбіжностей між підрозділами та групами підприємств [4].

За видами діяльності галузь завершила рік із загальним прибутком $\approx 1,308$ млрд грн. Ключовим драйвером стали спеціалізовані будівельні роботи – $\approx 4,878$ млрд грн. Натомість будівництво будівель залишалося збитковим – $\approx -3,568$ млрд грн, а будівництво споруд дало майже нульовий результат $\approx -0,0018$ млрд грн, що у підсумку не вплинуло істотно на баланс.

У розрізі розміру підприємств вирішальну роль відіграли середні компанії з прибутком $\approx 5,101$ млрд грн. Внесок великих підприємств був позитивним, але помірним – $\approx 0,586$ млрд грн. Водночас, малі підприємства у цілому

продемонстрували збиток $\approx -4,378$ млрд грн; у складі малих мікропідприємства мають найгіршу динаміку ($\approx -7,152$ млрд грн як підмножина категорії «малі»). Важлива деталь: попри від’ємний сумарний результат малих, у сегменті спеціалізованих робіт і малі, і мікропідприємства мали прибуток, однак його не вистачило, щоб перекрити глибокі втрати малих/мікро в будівництві будівель.

Отже, позитивний підсумок галузі у 2024 р. сформували насамперед середні підприємства та високоприбутковий сектор спеціалізованих робіт. Це вказує на структурну неоднорідність фінансової стійкості: підрядники, що працюють у спеціалізованих видах робіт, адаптувалися краще зокрема завдяки зростанню інфраструктурних замовлень, тоді як бізнес-модель, орієнтована на будівництво будівель, залишалася найбільш ризиковою особливо для малих і мікрокомпаній.

Таблиця 4

Зведений фінансовий результат до оподаткування підприємств з розподілом на великі, середні, малі та мікропідприємства будівельної галузі у 2024 р., тис. грн

Table 4

Consolidated financial result before taxation of enterprises broken down into large, medium, small, and micro enterprises in the construction industry in 2024, thousand UAH

Показник	Фінансовий результат, тис. грн	Великі підприємства	Середні підприємства	Малі підприємства	з них мікропідприємства
Будівництво (усього)	1 308 127,1	+585 805,0	+5 100 804,9	-4 378 482,8	-7 151 653,7
Будівництво будівель	-3 567 913	+946 695,0	+2 263 553,9	-6 778 161,9	-7 983 044
Будівництво споруд	-1 752,1	-360 890,0	+881 754,7	-522 616,8	-196 492,1
Спеціалізовані будівельні роботи	4 877 792,2	–	+1 955 496,3	+2 922 295,9	+1 027 882,4

¹ Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії. Сформовано автором за даними [4]

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна представленого дослідження полягає у тому, що:

1. Вперше здійснено комплексний статистичний аналіз кумулятивного впливу двох послідовних системних шоків – пандемії COVID-19

та повномасштабної війни – на будівельну галузь України у 2020–2024 рр.

2. Ідентифіковано й кількісно підтверджено структурний зсув інвестицій: від житлового сегмента – до інженерних споруд і промислово-виробничих об’єктів (у 2024 р.: інженерні споруди $\approx 58\%$, нежитлові будівлі $\approx 29\%$, житлові будинки $\approx 13\%$ у підсумку галузі).

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

3. Виявлено драйвери відновлення 2023–2024 рр. мобілізаційного характеру: пріоритетні програми відбудови критичної інфраструктури (енергетика, транспорт/комунікації, промислові комплекси) та ефект низької бази у низці підвидів.

4. Встановлено нові структурні диспропорції у кадровому та фінансовому вимірах:

– ринок праці: зростання ролі малих і мікропідприємств у зайнятості (58,7 % і 25,4 % у 2024 р.) на тлі суттєвого скорочення загальної чисельності порівняно з довоєнним періодом;

– фінанси: поляризація результатів у 2024 р.: сукупно галузь – +1,308 млрд грн; ключові позитивні внески – середні підприємства (+5,101 млрд грн) та спеціалізовані будівельні роботи (+4,878 млрд грн); від’ємні – будівництво будівель (–3,568 млрд грн), малі (–4,378 млрд грн) та мікропідприємства (–7,152 млрд грн).

Практична значимість одержаних результатів полягає у тому, що отримані результати можуть бути використані:

– органами державної влади – для коригування стратегій повоєнної відбудови, пріоритизації інфраструктурних інвестицій, підвищення прозорості розподілу ресурсів і ризик-менеджменту програм;

– суб’єктами господарювання – для адаптації бізнес-моделей до «воєнної» структури попиту: диверсифікації портфеля на користь інфраструктурних/промислових проєктів, оптимізації ланцюгів постачання та планування ресурсів (BIM–4D/5D, гнучкі контрактні моделі).

– науково-освітніми установами – як емпірична база для подальших досліджень і оновлення освітніх програм з організації та управління будівництвом в умовах воєнної та повоєнної економіки.

Висновки

Дослідження підтвердило, що після двох шоків сектор будівництва з 2023 р. увійшов у фазу поступового відновлення. Це відновлення має не лише циклічний, а й структурний характер: попит і ресурси зміщуються від житлового сегмента до інфраструктурних та промислово-виробничих проєктів.

Ринок праці перебудовується в бік малих і мікропідприємств, а фінансові результати за-

лишаються неоднорідними між видами діяльності та розмірними групами. Реалізація відбудови суттєво спирається на публічні програми і вимагає підвищеної прозорості управління строками, вартістю та ризиками. Порівняння здійснювалися на гармонізованій територіальній основі, що мінімізує викривлення від змін охоплення після 2022 р. [10, 11].

Організаційно-технологічні рекомендації:

1. Пріоритет інженерної інфраструктури. Формувати портфель проєктів з уніфікованими стандартами швидкого розгортання; застосовувати індустріалізовані та модульні рішення, а також наскрізну координацію на базі BIM для скорочення циклу «проєктування – будівництво – введення».

2. Фокус на промислові об’єкти. Масштабувати компетенції керування складними виробничими проєктами: оновити проєктно-кошторисну базу, оптимізувати логістику спеціального обладнання, використовувати поетапні пуски та сценарне планування.

3. Кадрова модель під ринкову структуру. За домінування малих і мікропідприємств – переходити до мережевих схем субпідряду, мобільних бригад і коротких контрактів; розгорнути безперервне навчання, атестацію та програми збереження ядра кваліфікованих кадрів.

4. Цифрове управління ризиком, строками і вартістю. Запроваджувати BIM–4D/5D, єдине середовище даних, хмарний моніторинг виконання; уніфікувати процедури управління змінами та контролю вартості; забезпечити аудити прозорості й повний цифровий слід ухвалених рішень [6, 8].

5. Стійкість та енергоефективність як норма. Проєктувати за підходом вартості життєвого циклу; інтегрувати відновлювані джерела енергії, резервування критичних систем, використання локальних матеріалів; надавати пріоритет рішенням, що зменшують експлуатаційні витрати та підвищують надійність [5].

6. Контрактні моделі і закупівлі. Використовувати договори з чітким розподілом ризиків і механізмами оплати за результат, антикорупційними приписами та відкритою звітністю; синхронізувати вимоги замовника, підрядників і постачальників через стандартизовані регламенти.

7. Дані та відтворюваність. Підтримувати уніфіковані класифікатори, відкриті формати

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

й періодичні оновлення статистики; у таблицях і рисунках чітко фіксувати територіальне охоплення та метод обчислення показників.

Такий набір узагальнень і практичних кроків забезпечує керованість відбудовчих програм і знижує ризики проєктів у середовищі високої невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кількість найманих працівників на підприємствах за видами економічної діяльності з розподілом на великі, середні, малі та мікропідприємства у 2010–2024 роках. *Державна служба статистики України*. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2022/fin/fin_new/Knp_kved_10_21.xlsx
2. Кривдик В. І., Матюх С. А. Стан та тенденції розвитку будівельної галузі України. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2020. № 4, Т. 2. С. 101–105. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2020-284-4\(2\)-17](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2020-284-4(2)-17)
3. Обсяг виробленої будівельної продукції за видами у 2014–2024 роках. *Державна служба статистики України*. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2022/bud/ovb_vid/ovb_10-22ue.xls
4. Фінансові результати до оподаткування підприємств за видами економічної діяльності з розподілом на великі, середні, малі та мікропідприємства (без урахування банків) за 2010–2024 роки. *Державна служба статистики України*. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/fin/fin_new/fr_op_ek_vsmm_2010_2020_ue.xlsx
5. Cespedes-Cubides A. S., Jradi M. A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, 2024. No. 7. 11. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7>
6. Demian P., Hassan T. M., Kalmykov O., Demianenko I., Makarov R. BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*. 2024. Vol. 14, Iss. 11. 3495. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14113495>
7. How did the war impact the Ukrainian labour market? *International Labour Organization*. 2024. URL: <https://www.ilo.org/resource/news/how-did-war-impact-ukrainian-labour-market>
8. Pishdad P., Onungwa I. O. Analysis of 5D BIM for cost estimation, cost control and payments. *Journal of Information Technology in Construction*. 2024. Vol. 29. P. 525–548. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024>
9. Ukraine – Employment, Mobility and Labour Market Dynamics in Ukraine – November 2024. *International Organization for Migration*. URL: <https://dtm.iom.int/fr/node/45426>
10. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): Feb 2022 – Dec 2023. *World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations*. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2024-02/UARDNA3reportEN.pdf>
11. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. *World Bank Group*. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>

I. D. SHONIIA^{1*}, S. M. OLKHOVYK^{2*}

^{1*}Dep. of Organisation and Management in Construction, Ukraine State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel.+38 (063) 410 63 81, e-mail shoniyairakliy@gmail.com, ORCID 0009-0001-8325-377X

^{2*}Dep. of Organisation and Management in Construction, Ukraine State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel.+38 (097) 431 94 24, e-mail serge.olkhovyk@gmail.com, ORCID 0009-0000-8578-1579

Statistical Analysis of the Development of Ukraine's Construction Industry in 2020–2024 and Organizational-Technological Implications

Purpose. To provide a coherent and accessible assessment of changes in Ukraine's construction sector during the crisis period; to show how these shifts affected output, demand structure, the labor market, and firms' financial performance; and to derive practical guidance for organizing reconstruction. **Methodology.** The study combines general scientific approaches with transparent statistical procedures. Comparisons are conducted on a harmonized,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

fixed territorial basis, excluding temporarily occupied territories and areas of active hostilities. We employ fixed-base and chain indices to track dynamics, a structural analysis of shares by construction product type, and a decomposition of sub-sector contributions to changes in aggregate indicators. Sensitivity checks are performed for the choice of base period and weighting choices, complemented by logical cross-checks of totals. **Findings.** We identify a sequence of contraction, adaptation, and gradual recovery. Evidence shows a persistent shift in demand from residential building towards engineering infrastructure and industrial facilities. The role of small and micro enterprises in employment increases, while financial outcomes diverge notably across activity types and firm-size groups. The findings also underline reliance on public reconstruction programs and the importance of transparent management of schedules, costs, and logistics. **Originality.** We propose a concise yet rigorous analytical framework that separates organic recovery from statistical base effects and changes in coverage. The nature of structural shifts is clarified; quantitative estimates of sub-sector contributions are produced; and the use of a fixed territorial basis is justified for correct intertemporal comparison. **Practical value.** The results support the prioritization of critical-infrastructure projects, realistic planning of resources and supply chains, and the design of contracting models with strengthened control of risk and cost. The analysis further substantiates the deployment of building information modelling with time and cost dimensions, the use of modular and industrialized solutions, flexible subcontracting arrangements, and digital monitoring—measures that enhance project controllability and coordination among stakeholders in a volatile environment.

Keywords: construction industry; output; 2020–2024 dynamics; construction output indices; engineering structures; non-residential buildings; BIM technologies; post-war recovery; construction logistics; organizational-technological implications

REFERENCES

1. Financial results before taxation of enterprises by type of economic activity with a breakdown by large, medium, small and microenterprises (excluding banks) in 2010–2024. (n. d.). *Official Statistics Portal*. Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/fin/fin_new/fr_op_ek_vsmm_2010_2020_ue.xlsx (in Ukrainian)
2. Kryvdyk, V., & Matiukh, S. (2020). State and Trends of Development of the Construction Industry of Ukraine. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 4(2), 101–105. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2020-284-4\(2\)-17](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2020-284-4(2)-17) (in Ukrainian)
3. Volume of construction production by type in 2014–2024. (n. d.). *Official Statistics Portal*. Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2022/bud/ovb_vid/ovb_10-22ue.xls (in Ukrainian)
4. Financial results before taxation of enterprises by type of economic activity with a breakdown by large, medium, small and microenterprises (excluding banks) in 2010–2024. (n. d.). *Official Statistics Portal*. Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/fin/fin_new/fr_op_ek_vsmm_2010_2020_ue.xlsx (in Ukrainian)
5. Cespedes-Cubides, A. S., & Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, 7(11). DOI: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7> (in English)
6. Demian, P., Hassan, T. M., Kalmykov, O., Demianenko, I., & Makarov, R. (2024). BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*, 14(11), 3495. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14113495> (in English)
7. How did the war impact the Ukrainian labour market? (2024, January 24). *International Labour Organization*. Retrieved from <https://www.ilo.org/resource/news/how-did-war-impact-ukrainian-labour-market> (in English)
8. Pishdad, P., & Onungwa, I. O. (2024). Analysis of 5D BIM for cost estimation, cost control and payments. *Journal of Information Technology in Construction*, 29, 525–548. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024> (in English)
9. Ukraine – Employment, Mobility and Labour Market Dynamics in Ukraine – November 2024. (2024, November). *International Organization for Migration*. Retrieved from <https://dtm.iom.int/fr/node/45426> (in English)
10. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): Feb 2022 – Dec 2023. (2024, February 24). *World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations*. Retrieved from <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2024-02/UARDNA3reportEN.pdf> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

11. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. (2025, February 25). *World Bank Group*. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.08.2025

Прийнята до друку: 12.12.2025

Тематичний покажчик журналу «Наука та прогрес транспорту»
за 2025 рік

Назва статті	№ журналу	Стор.
Автоматизовані системи управління на транспорті		
<i>А. В. ЗУБКО, В. І. ЩЕКА</i> Урахування верхньої межі похибки вимірювального комплексу під час аналізу оцифрованих сигналів	1	5
<i>Н. В. МАЛОВІЧКО</i> Розробка методики пошуку відмов в електричній централізації з використанням орієнтованих дерев	1	13
<i>К. В. ГОНЧАРОВ, Р. В. РИБАЛКА, В. В. МАЛОВІЧКО</i> Підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації	4	5
<i>А. В. ЗУБКО</i> Рівнева класифікація електромагнітного впливу у сертифікаційних випробуваннях електрорухомого складу	4	17
Екологія та промислова безпека		
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. А. КОЗАЧИНА, М. В. КИРИЧЕНКО, М. О. СКУРАТОВ, А. О. ЧІРКОВ, Г. К. ФІЛОНЕНКО</i> Математичні моделі в задачах очищення води	1	5
<i>В. В. БІЛЯЄВА, С. А. ЩЕРБИНА</i> Експрес-модель для аналізу процесу нагрівання ґрунту в теплиці	1	14
<i>В. А. КОЗАЧИНА, М. М. БІЛЯЄВ, В. В. БІЛЯЄВА, П. В. СЕМЕНЕНКО, З. М. ЯКУБОВСЬКА</i> Математичне моделювання теплового режиму в обтічнику ракети-носія на етапі передстартової підготовки	1	23
<i>В. М. КУЗНЕЦОВ, В. В. БІЛЯЄВА, О. В. БЕРЛОВ, О. В. ЗВОНАРЬОВА, П. Б. МАШИХІНА</i> Математичне моделювання забруднення повітря біля автодоріг та оцінювання ризику захворювань у людей, які перебувають у зоні впливу викидів від автомобілів	1	32
<i>П. Б. МАШИХІНА, М. М. БІЛЯЄВ, А. В. КАЛАШНИКОВ, В. В. ЦУРКАН, ЗАУР НАБІЄВ, Б. В. СЄРЄДІН</i> Швидкорозрахункові моделі в задачах водокористування	1	40
<i>О. О. МЕДВЕДСЬКА, С. В. ДЗЮБА, І. В. КАЛАШНИКОВ, М. М. БІЛЯЄВ, В. А. КОЗАЧИНА</i> Оцінювання ефективності використання габіонів для захисту від ураження промислових об'єктів	1	49
<i>О. А. БУБНОВА, В. А. МІРОШНИК, Р. В. МАРКУЛЬ, П. Б. МАШИХІНА, Л. Г. ТАТАРКО</i> Математичне моделювання фільтрації та геоміграції в умовах техногенного навантаження	2	21

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>О. О. МЕДВЕДСВА, С. В. ДЗЮБА, М. М. БІЛЯЄВ, В. А. КОЗАЧИНА, П. С. КІРІЧЕНКО</i> Прогнозування зон забруднення атмосферного повітря від полігонів твердих побутових відходів	2	29
<i>В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ, Г. П. ІВАНОВА</i> Акумуляторні батареї електромобілів: технічні та екологічні аспекти	2	35
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. В. БІЛЯЄВА, П. С. КІРІЧЕНКО, В. А. КОЗАЧИНА, В. М. ПОЛТОРАЦЬКА</i> Математичне моделювання процесу нестационарної теплопровідності крізь стінку	3	5
<i>О. А. БУБНОВА, В. А. МІРОШНИК, Р. В. МАРКУЛЬ, П. Б. МАШИХІНА, О. В. БЕРЛОВ</i> Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах: прикладні аспекти	3	14
<i>О. О. МЕДВЕДСВА, С. В. ДЗЮБА, О. Л. ТЮТЬКІН, П. Б. МАШИХІНА, О. В. БЕРЛОВ</i> Моделювання фільтрації та геоміграції при техногенному впливі на грунтові води	3	21
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. В. КОЗАЧИНА, О. Ю. ГУНЬКО, В. М. КУЗНЕЦОВ, О. В. ЗВОНАРЬОВА</i> Математичне моделювання процесу нейтралізації агресивної домішки у підземних водах: експрес модель	4	27
<i>В. В. БІЛЯЄВА, С. А. ЩЕРБИНА</i> Чисельні моделі в прикладних задачах тепломасопереносу	4	34
<i>В. В. ГУДІМОВ</i> Актуальні питання заходів безпеки при логістиці залізничним транспортом	4	41
<i>О. О. МЕДВЕДСВА, В. В. БІЛЯЄВА, П. С. КІРІЧЕНКО, В. А. КОЗАЧИНА, А. Ю. УСЕНКО</i> Математичне моделювання забруднення повітря після вибуху в кар'єрі: експрес прогноз	4	50
<i>Т. І. РУСАКОВА, О. В. БЕРЛОВ, О. І. ГУБІН, О. Ю. ГУНЬКО, П. Б. МАШИХІНА</i> Моделювання забруднення довкілля на базі швидко розрахункових моделей	4	58
<i>В. Ю. УЛЬЯНОВ, В. В. БІЛИК</i> Про необхідність проведення додаткових стрес-тестів для оцінки безпеки гідротехнічних споруд на території Запорізької АЕС	4	65
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси		
<i>О. Б. ГНИЛЕНКО, С. В. ПЛАКСІН</i> Дослідження впливу графенових контактів на ефективність фотоелектричного перетворення в багатоперехідному сонячному елементі з вертикальними р–п переходами	1	58

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>Е. К. МАНАФОВ, Х. Б. ГУЛІЄВ, Ф. Г. ГУСЕЙНОВ</i> Оцінка технічного стану тягових двигунів у реальному часі за допомогою технологій машинного навчання та IoT	2	50
<i>А. М. МУХА, С. В. ПЛАКСІН, Д. В. УСТИМЕНКО, Ю. В. ШКІЛЬ, О. В. КІТАЄВ, А. П. АНТОНЮК</i> Аналіз передумов до створення дворезимного тягово-левітаційного модуля другого покоління	2	65
<i>Є. М. ЧУПРИНА, А. М. МУХА, О. І. БОНДАР, С. В. ПЛАКСІН, Д. В. УСТИМЕНКО, О. О. ГОЛОТА</i> Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту	3	79
<i>М. І. БЕРЕЗОВИЙ, М. П. БОЖКО, В. В. МАЛАШКІН, Т. В. БОЛВАНОВСЬКА, О. О. МАЗУРЕНКО</i> Аналіз впливу взаємного розташування уповільнювачів та обхідних колій на довжину гіркових горловин і їх автоматизоване проєктування	3	29
<i>Д. О. БОСИЙ, О. І. САБЛИН, І. Ю. ПОТАПЧУК</i> Підвищення рівня безпеки і захищеності транспортної інфраструктури від повітряних загроз на основі їх акустичної ідентифікації	4	108
Експлуатація та ремонт засобів транспорту		
<i>Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Є. Б. БОДНАР</i> Комплексне діагностування тепловозів з гідروпередачею: підходи та методи	2	76
<i>Д. М. КОЗАЧЕНКО, О. В. КЛИГА, Є. В. ХАРЧЕНКО</i> Моделювання составів поїздів у задачах техніко-експлуатаційної оцінки залізничних станцій	2	88
<i>В. В. КРІВДА, І. Г. ОЛШЕВСЬКИЙ, В. Є. ОЛШЕВСЬКА</i> Блок циліндрів і гільзи циліндрів двигунів внутрішнього згоряння: матеріали і особливості дефектування при ремонті	4	80
<i>В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ, Г. П. ІВАНОВА</i> Дослідження інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів	4	96
Залізнична колія та автомобільні дороги		
<i>М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, Д. Л. КОВАЛЬСЬКИЙ</i> Перспективи впровадження високошвидкісного руху на залізницях України	1	65
<i>М. Б. КУРГАН, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Р. В. ІВАНОВ, А. М. КУРГАН</i> Оцінка економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах	1	107
<i>М. Б. КУРГАН, Р. В. ІВАНОВ</i> Особливості будівництва переїздів при застосуванні суміщеної колії (1 520/1 435 мм) на мережі залізниць України	4	127

Назва статті	№ журналу	Стор.
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання		
<i>О. А. СИРОТА, В. М. ГОРЯЧКІН</i> Проблеми рефакторингу програмного коду із застосуванням штучного інтелекту	1	77
<i>Н. Д. СТЕПАНОВА, Д. М. СНИСАРЧУК</i> Моделювання показників роботи рушникосушарки в низькотемпературній системі створення мікроклімату	1	85
<i>Є. А. БЕЛЕГУРА, В. М. ГОРЯЧКІН</i> Застосування смарт-контрактів при формалізації ролей у системах вантажних перевезень	3	40
<i>Т. А. ЗАЙЦЕВА</i> Обернене моделювання механіки конструкційного контакту із застосуванням методу скінченних елементів	3	49
<i>О. М. КІСЕЛЬОВА, О. М. ПРИТОМАНОВА, О. О. КУЗЕНКОВ</i> Програмна реалізація алгоритму розв'язання динамічної задачі оптимального розбиття множин в умовах невизначеності	3	59
<i>А. А. ЖАДАН, В. І. ШИНКАРЕНКО</i> Сучасні методи та засоби роботи з часовими рядами	4	142
Машинобудування		
<i>В. М. БОГОМАЗ, В. Й. НАГАЧЕВСЬКИЙ</i> Дослідження впливу проєктних параметрів скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою на його технічні характеристики	1	93
<i>Р. П. ПОГРЕБНЯК</i> Раціональний структурний синтез схем кривошипно-повзункових механізмів захоплювальних пристроїв	2	98
<i>І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО, К. Ю. ШЕВЕЛЄВА</i> Вплив імпульсів напруження на обмежену витривалість при циклічному навантаженні термічно зміцненої вуглецевої сталі	3	68
Рухомий склад і тяга поїздів		
<i>Є. С. РЯБОВ, Б. Х. ЄРІЦЯН, А. С. ТИХОНОВ, О. А. ХАЗОВ</i> Гібридна тягова система для вивізного локомотива промислових кар'єрних залізниць	1	104
<i>Л. В. УРСУЛЯК, О. О. БОЛОТОВ</i> Дослідження поздовжньої динаміки пасажирських поїздів для надання рекомендацій з керування ними на нових ділянках Азербайджанської залізниці	1	116
<i>С. В. ПАНЧЕНКО, А. О. ЛОВСЬКА, М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ, П. В. РУКАВІШНИКОВ, Д. Г. ПЕТРЕНКО, М. Г. РАВЛЮК</i> Експериментальне дослідження міцності кришки люка піввагона під час перевезення в ньому контейнерів	2	119

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, О. Е. ХАУСТОВ, М. І. СТЕЦЕНКО</i> Визначення складових елементів трикомпонентного гібридного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу	3	154
<i>О. В. НЕВЕДРОВ, О. М. ГОРОБЧЕНКО, Д. О. ЗАІКА, В. С. ТЕРЕЩЕНКО</i> Прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза із застосуванням Марковського методу аналізу	3	164
<i>О. В. ФОМІН, О. С. КОЗИНКА</i> Математичне формулювання цільової функції підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів антивібраційними покриттями	3	174
<i>Є. С. РЯБОВ, Б. Х. ЄРІЦЯН, Є. В. ЛИСЕНКО, Є. Г. ЧЕРНИШЕНКО, А. Ю. ЖУКОВ</i> Підвищення тягових властивостей маневрового тепловозу ЧМЕЗ за рахунок розподілу тягового зусилля між осями тепловозу	4	155
Транспортне будівництво		
<i>В. К. МИРОНЕНКО, Я. О. ЗЮБРИК</i> Оцінка прогнозованого вантажопотоку інтер- / мультимодального транспортно-логістичного центру	1	132
<i>В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. П. ІВАНОВА, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ</i> Переробка свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів: виклики та перспективи	1	142
<i>Д. С. СПІВАК, С. В. КЛЮЧНИК</i> Вплив матеріалів і масштабного фактора на руйнування К-подібних вузлів трубобетонних мостів: ефективність конструктивних параметрів	1	152
<i>А. В. РАДКЕВИЧ, Д. О. БАННИКОВ, ДЖ. К. МА, Ю. З. ЛІ</i> Сучасні конструкції аркових несних систем громадських будівель	2	128
<i>А. В. РАДКЕВИЧ, Д. О. БАННИКОВ, Ш. П. ЧЕН, С. Ф. ФУ</i> Особливості сучасного проектування сталевих підкранових балок виробничих будівель	2	140
<i>К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, С. В. КЛЮЧНИК</i> Дослідження елементів понтонного мосту з огляду на сучасні виклики щодо вантажопідйомності	2	154
<i>О. Л. ТЮТЬКІН, Д. О. БОСІЙ, О. І. САБЛІН, Н. К. БОНДАРЕНКО</i> Оцінка вибухового впливу та методика виявлення безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену	2	165
<i>Д. С. СПІВАК, С. В. КЛЮЧНИК</i> Методика визначення ефективних параметрів трубобетонних балкових ферм з їздою зверху	2	176
<i>В. С. АНДРСЄВ, В. О. П'ЄЛИК</i> Принципи та моделі розрахунку осідань фундаментів для розрахунку деформацій ґрунтових основ	2	91

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>О. І. ДУБІНЧИК, І. М. ІЛЬНИЦЬКИЙ</i> Обґрунтування практичного застосування гвинтової палі зі спіральною лопаттю (геошурупу) під час будівництва пальових фундаментів	3	98
<i>В. Є. ОЛІШЕВСЬКА, Г. С. ОЛІШЕВСЬКИЙ, Г. П. ІВАНОВА</i> Металеві конструкційні матеріали для виробництва і ремонту деталей автомобілів: практика та перспективи	3	111
<i>А. В. РАДКЕВИЧ, М. М. ЛЯХОВЕЦЬКА-ТОКАРСЬКА, С. В. ГАВРИЛЮК</i> Оптимізація енергоефективності будівлі багатопрофільного медичного центру	3	130
<i>О. Л. ТЮТЬКІН, І. В. ДЕМЧЕНКО</i> Чисельний аналіз напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення	3	145
<i>Г. І. ГАЙКО, І. О. САВЧЕНКО, В. П. ТАРАСЮК, Д. О. БЕСПАЛОВ</i> Автомобільні тунелі як фактор кліматичної нейтральності великого міста	4	166
<i>Т. С. КРАВЧУНОВСЬКА, К. В. БАЛАКІН</i> Обґрунтування оптимальної послідовності реконструкції промислових будівель у проєктах ревіталізації з урахуванням їх майбутньої функції	4	181
<i>О. Л. ТЮТЬКІН, Д. О. БАННИКОВ, І. С. ОСТАПЕНКО, М. В. ГЕРНИЧ</i> Засади концепції зворотної конверсії для обґрунтування застосування підземних споруд метрополітену в якості укріплень	4	190
<i>К. Є. ФЕДОРОВ, О. Л. ТЮТЬКІН</i> Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу	4	200
<i>І. Д. ШОНІЯ, С. М. ОЛЬХОВИК</i> Статистичний аналіз розвитку будівельної галузі України у 2020–2024 роках та організаційно-технологічні висновки	4	210

Subject index to the journal «Nauka ta Progres Transportu = Science and Transport Progress» for 2025

Article title	Journal number	Page
Automated and Telematic Systems on Transport		
<i>A. V. ZUBKO, V. I. SHCHEKA</i> Consideration of the Upper Error Bound of Measurement Complex in the Analysis of Digitized Signals	2	5
<i>N. V. MALOVICHKO</i> Development of a Methodology for Fault Detection in Electrical Centralization Using Oriented Trees	2	13
<i>K. V. HONCHAROV, R. V. RYBALKA, V. V. MALOVICHKO</i> Increasing the Capacity and Interference Immunity of the Data Transmission Channel in the Automatic Cab Signalling System	4	5
<i>A. V. ZUBKO</i> Level-Based Classification of Electromagnetic Effects in Certification Tests of Electric Rolling Stock	4	17
Ecology and Industrial Safety		
<i>M. M. BILIAIEV, V. A. KOZACHYNA, M. V. KYRYCHENKO, M. O. SKURATOV, A. O. CHIRKOV, H. K. FILONENKO</i> Mathematical models for water treatment problems	1	5
<i>V. V. BILIAIEVA, S. A. SHCHERBYNA</i> Express Model for Analyzing the Process of Soil Heating in a Greenhouse	1	14
<i>V. A. KOZACHYNA, M. M. BILIAIEV, V. V. BILIAIEVA, P. V. SEMENENKO, Z. M. YAKUBOVSKA</i> Mathematical Modeling of Thermal Regime in the Launch Vehicle Fairing at the Stage of Prelaunch Preparation	1	23
<i>V. M. KUZNETSOV, V. V. BILIAIEVA, O. V. BERLOV, O. V. ZVONAROVA, P. B. MASHYKHINA</i> Mathematical Modeling of Air Pollution Near Roads and Assessment of Disease Risk in People Exposed to Vehicle Emissions	1	32
<i>P. B. MASHYKHINA, M. M. BILIAIEV, A. V. KALASHNYKOV, V. V. TSURKAN, ZAUR NABIIEV, B. V. SIERIEDIN</i> Fast Computational Models in Water Use Problems	1	40
<i>O. O. MEDVEDIEVA, S. V. DZIUBA, I. V. KALASHNIKOV, M. M. BILIAIEV, V. A. KOZACHYNA</i> Evaluation of gabions usage effectiveness for industrial facilities protection against damage	1	49
<i>O. A. BUBNOVA, V. A. MIROSHNYK, R. V. MARKUL, P. B. MASHYKHINA, L. H. TATARKO</i> Mathematical Modeling of Filtration and Geomigration Under Conditions of Anthropogenic Load	2	21
<i>O. O. MEDVEDIEVA, S. V. DZIUBA, M. M. BILIAIEV, V. A. KOZACHYNA, P. S. KIRICHENKO</i> Forecasting Zones of Air Pollution from Solid Waste Landfills	2	29

Article title	Journal number	Page
<i>V. E. OLISHEVSKA, H. S. OLISHEVSKYI, H. P. IVANOVA</i> Electric Vehicle Batteries: Technical and Environmental Aspects	2	35
<i>M. M. BILIAIEV, V. V. BILIAIEVA, P. S. KIRICHENKO, V. A. KOZACHYNA, V. M. POLTORATSKA</i> Mathematical Modeling of the Process of Non-Stationary Heat Conduction Throughout the Wall	3	5
<i>O. A. BUBNOVA, V. A. MIROSHNYK, R. V. MARKUL, P. B. MASHYKHINA, O. V. BERLOV</i> Modelling of filtration and heat and mass transfer processes in groundwater: applied aspects	3	14
<i>O. O. MEDVEDIEVA, S. V. DZIUBA, O. L. TIUTKIN, P. B. MASHYKHINA, O. V. BERLOV</i> Modeling of filtration and geomigration under anthropogenic impact on groundwater	3	21
<i>M. M. BILIAIEV, V. V. KOZACHYNA, O.YU. GUNKO, V. M. KUZNETSOV, O. V. ZVONAROVA</i> Mathematical Modeling of the Neutralization Process of An Aggressive Impurity in Groundwater: An Express Model	4	27
<i>V. V. BILIAIEVA, S. A. SHCHERBYNA</i> Numerical Models in Applied Problems of Heat and Mass Transfer	4	34
<i>V. V. GUDIMOV</i> Current Issues of Safety Measures in Railway Transport Logistics	4	41
<i>O. O. MEDVEDIEVA, V. V. BILIAIEVA, P. S. KIRICHENKO, V. A. KOZACHYNA, A. YU. USENKO</i> Mathematical Modeling of Air Pollution After a Quarry Explosion: Express Forecast	4	50
<i>T. I. RUSAKOVA, O. V. BERLOV, O. I. GUBIN, O. YU. GUNKO, P. B. MASHYKHINA</i> Environment Pollution Modeling on the Base of Quick Computing Models	4	58
<i>V. YU. ULYANOV, V. V. BILYK</i> On the Need to Conduct Additional Stress Tests to Evaluate the Safety of the Hydraulic Structures Site at the Zaporizhzhia NPP	4	65
Electric Transport, Power Systems and Complexes		
<i>B. GNILENKO, S. V. PLAKSIN</i> Study of the Influence of Graphene Contacts on the Efficiency of Photovoltaic Conversion in a Multi-junction Solar Cell with Vertical p–n Junctions	1	58
<i>E. K. MANAFOV, H. B. GULIYEV, F. H. HUSEYNOV</i> Real-Time Assessment of the Technical Condition of Traction Motors Using Machine Learning and IoT Technologies	2	50
<i>A. M. MUKHA, S. V. PLAKSIN, D. V. USTYMENKO, YU. V. SHKIL, O. V. KITAYEV, A. P. ANTONIUK</i> Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module	2	65
<i>Y. M. CHUPRYNA, A. M. MUKHA, O. I. BONDAR, S. V. PLAKSIN, D. V. USTYMENKO, O. O. HOLOTA</i> Research of the Dynamic Indicators of the Track Coil of a Full-Scale Model of High-Speed Magnetic Levitation Transport	3	79

Article title	Journal number	Page
<i>D. O. BOSYI, O. I. SABLIN, I. YU. POTAPCHUK</i> Increasing the Level of Safety and Security of Transport Infrastructure from Air Threats Based on Their Acoustic Identification	4	108
Operation and Repair of Transport Means		
<i>B. Y. BODNAR, O. B. OCHKASOV, Y. B. BODNAR</i> Comprehensive Diagnostics of Diesel Locomotives with Hydraulic Transmission: Approaches and Methods	2	76
<i>D. M. KOZACHENKO, O. V. KLYGA, YE. V. KHARCHENKO</i> Modeling of Train Sets in Tasks of Railway Stations Technical and Operational Evaluation	2	88
<i>M. I. BEREZOVYI, M. P. BOZHKO, V. V. MALASHKIN, T. V. BOLVANOVSKA, O. O. MAZURENKO</i> Analysis of the Influence of the Relative Position of Retarders and Bypass Tracks on the Length of the Neck of the Sorting Slide and Their Automated Design	3	29
<i>V. V. KRIVDA, I. H. OLISHEVSKYI, V. E. OLISHEVSKA</i> Cylinder Block and Cylinder Liners of Internal Combustion Engines: Materials and Features of Defect Detection During Repair	4	80
<i>V. E. OLISHEVSKA, H. S. OLISHEVSKY, H. P. IVANOVA</i> Research on Innovative Materials for Automobile Repair	4	96
Railroad and Roadway Network		
<i>M. B. KURHAN, D. M. KURHAN, N. P. KHMELEVSKA, D. L. KOVALSKYI</i> Prospects for the Implementation of High-Speed Railway in Ukraine	1	65
<i>M. B. KURHAN, O. F. LUZHYTSKYI, R. V. IVANOV, A. M. KURHAN</i> Assessment of Economic Losses of Road Transport Due to Unproductive Downtime at Railway Crossings	2	107
<i>M. B. KURHAN, R. V. IVANOV</i> Features of Level Crossing Construction with the Use of Dual Gauge (1520/1435 mm) on the Ukrainian Railway Network	4	127
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling		
<i>O. A. SYROTA, V. M. HORIACHKIN</i> Problems of Program Code Refactoring with the Use of Artificial Intelligency	1	77
<i>N. D. STEPANOVA, D. M. SNISARCHUK</i> Modeling the Performance of a Towel Dryer in a Low-Temperature Microclimate System	1	85
<i>Y. A. VELEHURA, V. M. HORIACHKIN</i> Application of Smart Contracts in the Formalization of Roles in Freight Transportation Systems	3	40
<i>T. A. ZAYTSEVA</i> Inverse Modeling of Structural Contact Mechanics Using the Finite Element Method	3	49
<i>E. M. KISELEVA, O. M. PRYTOMANOVA, O. O. KUZENKOV</i> Software Implementation of an Algorithm for Solving a Dynamic Problem of Optimal Set Partitioning Under Uncertainty	3	59
<i>A. A. ZHADAN, V. I. SHYNKARENKO</i> Modern methods and tools for working with time series	4	142

Article title	Journal number	Page
Material Science		
<i>I. O. VAKULENKO, S. O. PLITCHENKO, K. YU. SHEVELIEVA</i> The Effect of Stress Pulses on the Limited Endurance Under Cyclic Loading of Thermal-Hardened Carbon Steel	3	68
Mechanical Engineering		
<i>V. M. BOGOMAZ, V. J. NAGACHEVSKYI</i> Research of the Influence of Design Parameters of a Scraper Conveyor with an Upper Working Branch on its Technical Characteristics	1	93
<i>R. P. POHREBNIAK</i> Rational Structural Synthesis of Schemes of Crank-Slider Mechanisms of Gripping Devices	2	98
Rolling Stock and Train Traction		
<i>IE. S. RIABOV, B. KH. YERITSIAN, A. S. TYKHONOV, O. A. KHAZOV</i> Hybrid Traction System for a Haulage Locomotive for Industrial Quarry Railways	1	104
<i>L. V. URSULYAK, O. O. BOLOTOV</i> Study of the Longitudinal Dynamics of Passenger Trains to Provide Recommendations for Their Control on New Sections of the Azerbaijan Railways	1	116
<i>S. V. PANCHENKO, A. O. LOVSKA, M. V. PAVLIUCHENKOV, P. V. RUKAVISHNYKOV, D. H. PETRENKO, M. H. RAVLYUK</i> Experimental Research of the Strength of an Open Wagon Hatch Cover During the Transportation of Containers in it	2	119
<i>B. G. LIUBARSKYI, S. G. BURIAKOVSKYI, O. YD. KHAUSTOV, M. I. STETSENKO</i> Determination of the Constituent Elements of a Three-Component Hybrid Energy Storage Device for a Plug-In Power Plant for Rolling Stock	3	154
<i>O. V. NEVEDROV, O. M. GOROBCHENKO, D. O. ZAIKA, V. S. TERESHCHENKO</i> Prediction of the Technical Condition of the Brake System of a Diesel Locomotive using the Markov Analysis Method	3	164
<i>O. V. FOMIN, O. S. KOZYNKA</i> Mathematical Formulation of the Objective Function for Improving the Protection Efficiency of Load-Bearing Elements of Freight Cars Using Anti-Vibration Coatings	3	174
<i>YE. S. RIABOV, B. KH. YERITSYAN, YE. V. LYSENKO, YE. G. CHERNYSHENKO, A. YU. ZHUKOV</i> Improving the Traction Properties of the Shunting Diesel Locomotives ChME3 by Distributing the Traction Force Between the Axles of the Diesel Locomotive	4	155
Transport Construction		
<i>V. K. MYRONENKO, Y. O. ZIUBRYK</i> Estimation of the Forecasted Cargo Flow of an Inter-/ multimodal Transport and Logistics Center	1	132
<i>V. YE. OLOSHEVSKA, H. P. IVANOVA, H. S. OLISHEVSKYI</i> Recycling Lead Acid Car Batteries: Challenges and Prospects	1	142
<i>D. S. SPIVAK, S. V. KLIUCHNYK</i> Influence of Materials and Scale Factor on Failure of K-shaped Nodes of Pipe Concrete Bridges: Effectiveness of Design Parameters	1	152

Article title	Journal number	Page
<i>A. V. RADKEVYCH, D. O. BANNIKOV, J. C. MA, S. W. LIU</i> Modern Designs of Arch Load-Bearing Systems of Public Buildings	2	128
<i>A. V. RADKEVYCH, D. O. BANNIKOV, S. P. CHEN, X. F. FU</i> Features of Modern Design of Steel Crane Beams for Industrial Buildings	2	140
<i>K. M. PEREPELYTSIA, S. V. KLIUCHNYK</i> Research of Pontoon Bridge Elements in View of Modern Challenges in Terms of Load Capacity	2	154
<i>O. L. TIUTKIN, D. O. BOSYI, O. I. SABLIN, N. K. BONDARENKO</i> Assessment of Explosive Impact and Methods for Detecting Unmanned Aerial Vehicles During Protection of the Metro Vestibule	2	165
<i>D. S. SPIVAK, S. V. KLIUCHNYK</i> Methodology for Determining the Effective Parameters of Concrete-Filled Steel Tube Beam Trusses with Top-Deck Traffic	2	176
<i>V. S. ANDRIEIEV, V. O. PIELYK</i> Principles and Models for Calculating Foundation Settlements for Calculating Soil Base Deformations	3	91
<i>O. I. DUBINCHYK, I. M. ILNYTSKYI</i> The Latest Technologies in the Development and Practical Application of Helical Blade Screw Piles in Construction	3	98
<i>V. E. OLISHEVSKA, H. S. OLISHEVSKYI, H. P. IVANOVA</i> Metal Structural Materials for the Production and Repair of Automobile Parts: Practice and Prospects	3	111
<i>A. V. RADKEVYCH, M. M. LIAKHOVETSKA-TOKARIEVA, S. V. HAVRYLYUK</i> Optimization of energy efficiency of a multi-profile medical center building	3	130
<i>O. L. TIUTKIN, I. V. DEMCHENKO</i> Numerical Analysis of the Stress-Strain State of Two Unanchored Interacting Circular-Shaped Workings	3	145
<i>H. I. HAIKO, I. O. SAVCHENKO, V. P. TARASIUK, D. O. BESPALOV</i> Car Tunnels as a Climate Neutrality Factor for a Large City	4	166
<i>T. S. KRAVCHUNOVSKA, K. V. BALAKIN</i> Substantiation of the Optimal Sequence of industrial Building Reconstruction in Revitalization Projects, Taking into Account Their Future Function	4	181
<i>O. L. TIUTKIN, D. O. BANNIKOV, I. S. OSTAPENKO, M. V. HERNYCH</i> Principles of the Concept of Reverse Conversion to Substantiate the Use of Underground Metro Structures as Shelters	4	190
<i>K. YE. FEDOROV, O. L. TIUTKIN</i> Mathematical Modeling of the Pylon-Type Metro Station Design Based on Numerical Analysis	4	200
<i>I. D. SHONIYA, S. M. OLKHOVYK</i> Statistical Analysis of the Development of Ukraine's Construction Industry in 2020–2024 and Organizational-Technological Implications	4	210

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ**К. В. ГОНЧАРОВ, Р. В. РИБАЛКА, В. В. МАЛОВІЧКО**

Підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації 5

А. В. ЗУБКО

Рівнева класифікація електромагнітного впливу у сертифікаційних випробуваннях електрорухомого складу 17

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**М. М. БЛЯЄВ, В. В. КОЗАЧИНА, О. Ю. ГУНЬКО, В. М. КУЗНЕЦОВ, О. В. ЗВОНАРЬОВА**

Математичне моделювання процесу нейтралізації агресивної домішки у підземних водах: експрес модель 27

В. В. БЛЯЄВА, С. А. ЩЕРБИНА

Чисельні моделі в прикладних задачах тепломасопереносу 34

В. В. ГУДІМОВ

Актуальні питання заходів безпеки при логістиці залізничним транспортом 41

О. О. МЕДВЕДЕВА, В. В. БЛЯЄВА, П. С. КІРЧЕНКО, В. А. КОЗАЧИНА, А. Ю. УСЕНКО

Математичне моделювання забруднення повітря після вибуху в кар'єрі: експрес прогноз 50

Т. І. РУСАКОВА, О. В. БЕРЛОВ, О. І. ГУБІН, О. Ю. ГУНЬКО, П. Б. МАШИХІНА

Моделювання забруднення довкілля на базі швидко розрахункових моделей 58

В. Ю. УЛЬЯНОВ, В. В. БЛИК

Про необхідність проведення додаткових стрес-тестів для оцінки безпеки гідротехнічних споруд на території Запорізької АЕС 65

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**В. В. КРІВДА, І. Г. ОЛШЕВСЬКИЙ, В. Є. ОЛШЕВСЬКА**

Блок циліндрів і гільзи циліндрів двигунів внутрішнього згорання: матеріали і особливості дефектування при ремонті 80

В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ, Г. П. ІВАНОВА

Дослідження інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів 96

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ**Д. О. БОСИЙ, О. І. САБЛІН, І. Ю. ПОТАПЧУК**

Підвищення рівня безпеки і захищеності транспортної інфраструктури від повітряних загроз на основі їх акустичної ідентифікації 108

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ**М. Б. КУРГАН, Р. В. ІВАНОВ**

Особливості будівництва переїздів при застосуванні суміщеної колії (1 520/1 435 мм) на мережі залізниць України 127

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**А. А. ЖАДАН, В. І. ШИНКАРЕНКО**

Сучасні методи та засоби роботи з часовими рядами 142

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**Є. С. РЯБОВ, Б. Х. ЄРЦЯН, Є. В. ЛИСЕНКО, Є. Г. ЧЕРНИШЕНКО, А. Ю. ЖУКОВ**

Підвищення тягових властивостей маневрового тепловозу ЧМЕЗ за рахунок розподілу тягового зусилля між осями тепловозу 155

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**Г. І. ГАЙКО, І. О. САВЧЕНКО, В. П. ТАРАСЮК, Д. О. БЕСПАЛОВ**

Автомобільні тунелі як фактор кліматичної нейтральності великого міста 166

Т. С. КРАВЧУНОВСЬКА, К. В. БАЛАКІН

Обґрунтування оптимальної послідовності реконструкції промислових будівель у проєктах ревіталізації з урахуванням їх майбутньої функції 181

О. Л. ТЮТЬКІН, Д. О. БАННІКОВ, І. С. ОСТАПЕНКО, М. В. ГЕРНИЧ

Засади концепції зворотної конверсії для обґрунтування застосування підземних споруд метрополітену в якості укриттів 190

К. Є. ФЕДОРОВ, О. Л. ТЮТЬКІН

Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу 200

І. Д. ШОНІЯ, С. М. ОЛЬХОВИК

Статистичний аналіз розвитку будівельної галузі України у 2020–2024 роках та організаційно-технологічні висновки 210

ТЕМАТИЧНИЙ ПОКАЖЧИК ЖУРНАЛУ «НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ»

ЗА 2025 РІК 222

CONTENTS

AUTOMATED AND TELEMATIC SYSTEMS ON TRANSPORT

**K. V. HONCHAROV, R. V. RYBALKA,
V. V. MALOVICHKO**
Increasing the Capacity and Interference Immunity of the Data
Transmission Channel in the Automatic Cab Signalling
System 5

A. V. ZUBKO
Level-Based Classification of Electromagnetic Effects
in Certification Tests of Electric Rolling Stock 17

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, V. V. KOZACHYNA, O.YU. GUNKO,
V. M. KUZNETSOV, O. V. ZVONAROVA**
Mathematical Modeling of the Neutralization Process
of An Aggressive Impurity in Groundwater: An Express
Model 27

V. V. BILIAIEVA, S. A. SHCHERBYNA
Numerical Models in Applied Problems of Heat and Mass
Transfer 34

V. V. GUDIMOV
Current Issues of Safety Measures in Railway Transport
Logistics 41

**O. O. MEDVEDIEVA, V. V. BILIAIEVA,
P. S. KIRICHENKO, V. A. KOZACHYNA,
A. YU. USENKO**
Mathematical Modeling of Air Pollution After a Quarry
Explosion: Express Forecast 50

**T. I. RUSAKOVA, O. V. BERLOV, O. I. GUBIN,
O. YU. GUNKO, P. B. MASHYKHINA**
Environment Pollution Modeling on the Base of Quick
Computing Models 58

V. YU. ULYANOV, V. V. BILYK
On the Need to Conduct Additional Stress Tests to Evaluate
the Safety of the Hydraulic Structures Site at the Zaporizhzhia
NPP 65

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

**V. V. KRIVDA, I. H. OLISHEVSKYI,
V. E. OLISHEVSKA**
Cylinder Block and Cylinder Liners of Internal Combustion
Engines: Materials and Features of Defect Detection During
Repair 80

**V. E. OLISHEVSKA, H. S. OLISHEVSKY,
H. P. IVANOVA**
Research on Innovative Materials for Automobile Repair 96

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

D. O. BOSYI, O. I. SABLIN, I. YU. POTAPCHUK
Increasing the Level of Safety and Security of Transport
Infrastructure from Air Threats Based on Their Acoustic
Identification 108

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

M. B. KURHAN, R. V. IVANOV
Features of Level Crossing Construction with the Use
of Dual Gauge (1520/1435 mm) on the Ukrainian Railway
Network 127

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING

A. A. ZHADAN, V. I. SHYNKARENKO
Modern methods and tools for working with time series 142

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**YE. S. RIABOV, B. KH. YERITSYAN,
YE. V. LYSENKO, YE. G. CHERNYSHENKO,
A. YU. ZHUKOV**
Improving the Traction Properties of the Shunting Diesel
Locomotives ChME3 by Distributing the Traction Force
Between the Axles of the Diesel Locomotive 155

TRANSPORT CONSTRUCTION

**H. I. HAIKO, I. O. SAVCHENKO, V. P. TARASIUK,
D. O. BESPALOV**
Car Tunnels as a Climate Neutrality Factor
for a Large City 166

T. S. KRAVCHUNOVSKA, K. V. BALAKIN
Substantiation of the Optimal Sequence of industrial Building
Reconstruction in Revitalization Projects, Taking into Account
Their Future Function 181

**O. L. TIUTKIN, D. O. BANNIKOV, I. S. OSTAPENKO,
M. V. HERNYCH**
Principles of the Concept of Reverse Conversion
to Substantiate the Use of Underground Metro Structures
as Shelters 190

K. YE. FEDOROV, O. L. TIUTKIN
Mathematical Modeling of the Pylon-Type Metro Station
Design Based on Numerical Analysis 200

I. D. SHONIIA, S. M. OLKHOVYK
Statistical Analysis of the Development of Ukraine's
Construction Industry in 2020–2024 and Organizational-
Technological Implications 210

**SUBJECT INDEX TO THE JOURNAL «NAUKA TA
PROGRES TRANSPORTU = SCIENCE AND
TRANSPORT PROGRESS» FOR 2025 228**

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтю та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 4 (112) 2025

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 27,44. Тираж 100 пр. Зам. №02/04

Український державний університет науки і технологій

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 4 (112) 2025

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 27,44. Circulation 100. Order no. 02/04

Ukrainian State University of Science and Technologies

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

