



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 3(111)

• 2025 •

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 3 (111) 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); Манашкин 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 24.09.2025 р., протокол № 1

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. 3 (111) 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 24.09.2025, Protocol no. 1

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»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 614.83:[536.24:519.6]

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, В. В. БІЛЯЄВА², П. С. КІРІЧЕНКО³, В. А. КОЗАЧИНА⁴,
В. М. ПОЛТОРАЦЬКА⁵

¹Каф. «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. 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 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

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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Каф. екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38(056) 756 33 71, ел. пошта poltorskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

Математичне моделювання процесу нестационарної теплопровідності крізь стінку

Мета. Екстремальні ситуації на промислових об'єктах часто призводять до виникнення пожежі, зокрема, пожежі виникають в разі атаки дронів на нафтохранища. У такому випадку в повітря потрапляє значна кількість хімічно небезпечних речовин (продукти згорання палива) та з'являється ризик термічного ураження працівників. Для зменшення ризику термічного ураження використовують різні засоби та конструкції. Під час проектування захисних конструкцій потрібно заздалегідь визначити їх ефективність та час можливого руйнування. Це потребує розробки та використання спеціалізованих математичних моделей. Ця робота присвячена розробці чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати теплові поля на промисловому майданчику в разі пожежі та оцінювати ризик руйнування захисної стінки (бар'єру). **Методика.** Для чисельного розв'язання задач аеродинаміки (визначення поля швидкості вітру), розрахунку зон теплового забруднення повітря на промисловому майданчику та визначення динаміки зміни температури в середині захисного бар'єра (стінки) використовуємо фундаментальні моделі механіки суцільного середовища. Для чисельного розв'язання моделювальних рівнянь використовуємо кінцеченнорізницеві схеми. **Результати.** Розроблено комп'ютерну програму, що дає можливість розв'язувати «зв'язану» задачу з визначення зони теплового забруднення повітря на промисловому майданчику та динаміку нагрівання захисного бар'єра (стінки). За допомогою запропонованої чисельної моделі та комп'ютерної програми можна в режимі реального часу розв'язувати задачу теплопровідності та теплопереносу. **Наукова новизна.** Наведено швидкопорозрахункову чисельну модель для оцінювання часу руйнування захисного бар'єра на промисловому майданчику, де має місце пожежа. Аналіз теплових полів на промисловому майданчику та в середині захисного бар'єра здійснено шляхом чисельного інтегрування багаточленного рівняння теплопереносу та теплопровідності. Задачу аеродинаміки розв'язано на базі моделі потенціального руху. Ці чисельні моделі потребують незначного комп'ютерного часу за практичної реалізації. **Практична значимість.** Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для первинної оцінки температурного поля в середині захисного бар'єра з метою визначення її

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ефективності з точки зору захисту зон від теплового забруднення на промисловому майданчику. Ця інформація може бути корисною на форескіз-етапі розробки захисних споруд.

Ключові слова: захисний бар'єр; температурне поле; пожежа; теплоперенос; математичне моделювання; промисловий майданчик; охорона праці

Вступ

Екстремальні ситуації на промислових об'єктах часто призводять до виникнення пожежі (рис. 1, 2) [1–4, 6, 7, 13–15]. Слід підкреслити, що пожежі – це типові явища під час атаки дронів на нафтозховища. За такого явища в повітря потрапляє значна кількість хімічно небезпечних речовин (продукти згорання палива) та з'являється ризик термічного ураження працівників.



Рис. 1. Пожежа на промисловому майданчику з формуванням зони теплового забруднення [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]

Fig. 1. Fire at an industrial site – formation of a thermal pollution area [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]



Рис. 2. Пожежа на промисловому майданчику з викидом токсичних речовин [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]

Fig. 2. Fire at an industrial site release of toxic substances [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]

Для аналізу ризику токсичного ураження персоналу в разі викиду в повітря хімічно небезпечних речовин широко використовують модель Гауса [11] та чисельні моделі [5–8, 10], а для аналізу ризику термічного ураження – аналітичні та чисельні моделі [1–6]. Кожен клас моделей має свої переваги й недоліки.

Через значну температуру повітря під час пожежі виникає ризик займання інших сховищ. Тому важливим напрямом наукових досліджень є розробка засобів для зменшення ризику термічного ураження працівників та об'єктів на промисловому майданчику [5, 7]. Постає необхідність в ефективних математичних моделях, щоб за короткий час визначити потребу у використанні захисних засобів для конкретних умов експлуатації.

Мета

Під час проектування захисних конструкцій потрібно заздалегідь визначити їх ефективність та час можливого руйнування. Це вимагає розробки та використання спеціалізованих математичних моделей. Ця робота присвячена розробці чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати теплові поля на промисловому майданчику в разі пожежі та оцінювати ризик руйнування захисної стінки (бар'єра).

Методика

У разі виникнення пожежі на промисловому майданчику для захисту об'єктів використовують різного роду конструкції – стінки, габіони тощо. Тому виникає важлива задача оцінювання часу, коли захисна функція споруди зменшується та з'являється ризик її руйнування. Для розв'язання цієї важливої задачі потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. Слід вказати, що ця задача потребує розв'язання двох пов'язаних підзадач:

1) прогнозування динаміки формування теплових полів на промисловому майданчику та біля захисної стінки;

2) розрахунок процесу нестационарної теплопровідності крізь захисну конструкцію (стінку) та визначення часу, коли внаслідок нагрівання стінки може початися її руйнування.

Крім цього, перед розв'язанням цих двох підзадач потрібно визначити поле швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику за наявності на ньому різного роду перешкод. Сумісне розв'язання вказаних задач дуже ускладнює створення математичних моделей.

Для математичного моделювання процесу теплового забруднення повітря на промисловому майданчику в разі пожежі застосовують таке рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

де T – температура повітря на промисловому майданчику; a_x, a_y – коефіцієнти теплопровідності повітря; u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику; t – час.

Крайові мови:

1) початкова умова: $T_{t=0} = T_{A0}$, де T_{A0} – відома температура повітряного потоку на промисловому майданчику до початку пожежі;

2) на межі входження повітряного потоку до розрахункової зони $T = T_{in}$, де $T_{entrance}$ – відома температура повітряного потоку;

3) на межі виходу повітряного потоку з об'єкта: $\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{CD} = 0$, де \vec{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до межі зони;

4) на місці пожежі задають «внутрішню» граничну умову першого роду: $T = T_0$, де T_0 – відома температура.

Для визначення поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику використовують модель потенціального руху, модельовальне рівняння має вигляд:

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

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Для розв'язання рівняння (2) задано відповідні граничні та початкові умови:

1) $\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{AB} = U$ – умова Неймана на межі, де потік входить до розрахункової зони зі швидкістю U ;

2) на межі виходження повітряного потоку до розрахункової зони: $P = P_0 + const$ – умова Діріхле, де P_0 – довільна константа;

3) на твердих поверхнях, захисному бар'єрі, верхньої межі розрахункової зони реалізується умова: $\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{surface} = 0$, де \vec{n} – одиничний вектор до поверхні.

Після визначення поля потенціалу швидкості визначають компоненти вектора швидкості повітряного потоку на основі залежностей:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

Для розрахунку ступеня прогрівання захисного бар'єра використовують рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}), \quad (4)$$

де T – температура в середині бар'єра (стінки); a_x – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки; t – час.

Для рівняння (4) реалізують такі крайові умови (рис. 3):

1. На лівій межі (із зовнішньої сторони стінки) задають температуру повітря на відкритій місцевості, що змінюється з часом:

$$T_A = T(t), \quad (5)$$

де t – час.

2. На лівій межі цієї стінки задають значення температури $T_A = f(t, h)$ – це температура атмосферного повітря за стінкою, що змінюється з часом t та по висоті бар'єра h . На правій межі захисної стінки використовують також поточне значення температури, яке визначають під час розв'язання рівняння (1), тобто $T_B = f(t, h)$.

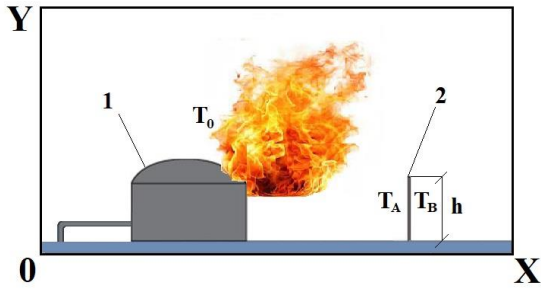


Рис. 3. Розрахункова схема:
1 – нафтохосовище; 2 – захисний бар'єр

Fig. 3. Calculation scheme:
1 – oil storage tank; 2 – protective barrier

Початкова умова – це значення температури в середині стінки T_A .

Таким чином, розв'язання рівняння (4) здійснюють у разі використання граничної умови першого роду на обох межах, що змінюються з часом.

У цій роботі слід розв'язати схожу задачу, а саме: виконати сумісне розв'язання рівнянь (1), (2), (4) за відповідних крайових умов. Алгоритм розв'язання такий:

1. Розв'язуємо «зовнішню» задачу, тобто шляхом розв'язання моделювального рівняння аеродинаміки визначаємо поле швидкості повітря в зоні дослідження.

2. Розв'язуємо «зовнішню» задачу, тобто шляхом розв'язання моделювального рівняння (1) визначаємо поле температури на промисловому майданчику та навколо захисного бар'єра для конкретного моменту часу.

3. Починаємо розрахунок процесу прогрівання стінки з урахуванням вказаних крайових умов.

4. Далі для нового розрахункового кроку за часом розраховуємо нове значення температури повітря на промисловому майданчику та навколо захисного бар'єра.

5. Знову здійснюємо розрахунок прогрівання стінки для нового поля температури на промисловому майданчику.

Таким чином визначаємо нестационарне значення температури стінки. Далі здійснюємо порівняння температури в середині стінки з температурою початку руйнування стінки T_{col} . Час досягнення цієї температури показує на час початку руйнування захисної конструкції.

Чисельні моделі. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використовуємо явну схему. Рівняння (2) зводимо до «нестационарного» вигляду:

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

де t – фіктивний час.

Далі використовуємо таку апроксимацію:

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

Розрахунок за цієї залежністю закінчується, коли:

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

де $P_{i,j}^{n+1}$ – значення потенціалу швидкості на новій ітерації; $P_{i,j}^n$ – значення потенціалу швидкості на попередній ітерації; ε – мале число.

Значення компонент швидкості розраховуємо на сторонах комірок так:

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

Для чисельного інтегрування рівняння (1) здійснюємо таку апроксимацію похідних:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) &\approx a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - a_x \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) &\approx a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - a_y \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1}. \end{aligned}$$

З урахуванням цих залежностей апроксимація рівняння (1) має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ T^{n+1} + L_x^- T^{n+1} + L_y^+ T^{n+1} + L_y^- T^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ T^{n+1} + L_{xx}^- T^{n+1} + L_{yy}^+ T^{n+1} + L_{yy}^- T^{n+1}). \quad (7) \end{aligned}$$

Далі має місце розщеплення (7) на чотири кроки:

– на першому кроці ($k = \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j}^{n+k} - T_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ T^{n+k} + L_y^+ T^{n+k}) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ T^{n+k} + M_{xx}^- T^n + M_{yy}^+ T^{n+k} + M_{yy}^- T^n); \quad (8) \end{aligned}$$

– на другому кроці ($k = n + \frac{1}{2}, c = n + \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned} \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- T^k + L_y^- T^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- T^k + M_{xx}^+ T^c + M_{yy}^- T^k + M_{yy}^+ T^c); \quad (9) \end{aligned}$$

– на третьому кроці ($k = n + \frac{3}{4}, c = n + \frac{1}{2}$) використовуємо залежність (9);

– на четвертому кроці ($k = n + 1, c = n + \frac{3}{4}$)

використовуємо залежність (8).

Для чисельного інтегрування моделювального рівняння (4) використовуємо явну різницеву схему:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \Delta t \cdot a_2 \frac{-T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}.$$

У разі використання неоднорідного матеріалу стінки (якщо, наприклад, матеріал має два шари різної теплопровідності): коефіцієнти теплопровідності визначаємо так:

$$a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i}; \quad a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i};$$

де a_1, a_2 – коефіцієнти теплопровідності для різних шарів матеріалу стінки.

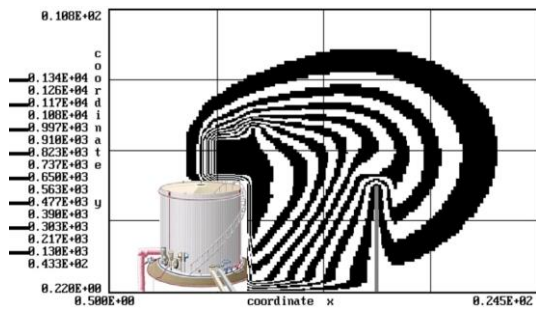
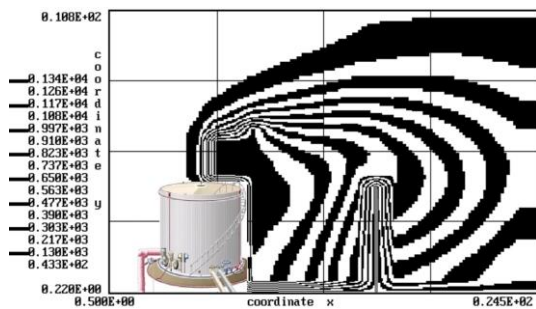
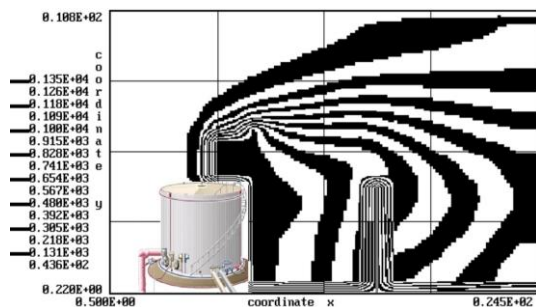
Для проведення обчислювальних експериментів здійснено програмну реалізацію побудованої чисельної моделі мовою FORTRAN.

Результати

Розроблені чисельні моделі було використано для розв'язання модельної задачі. Розглядаємо пожежу на промисловому майданчику. На певній довжині від нафтоховища розташований захисний бар'єр (рис. 3) (матеріал бар'єра – сталь). Ставимо задачу: визначити динаміку формування зони теплового забруднення на промисловому майданчику в разі виникнення пожежі та розрахувати температуру в середині захисного бар'єра.

Для проведення обчислювального експерименту швидкість вітру взято 7 м/с, температуру на місці пожежі 1 300 °С, висоту захисного бар'єра 4 м, товщину 2 см, матеріал – сталь. Початкова температура в середині захисного бар'єра 20 °С. Температура атмосферного повітря на промисловому майданчику дорівнює 20 °С.

Далі на рис. 4–6 показано динаміку формування температурних полів на промисловому майданчику для різних моментів часу після початку пожежі.

Рис. 4. Ізотерми, $t = 1,2$ сFig. 4. Isotherms, $t = 1,2$ sРис. 5. Ізотерми, $t = 1,9$ сFig. 5. Isotherms, $t = 1,9$ sРис. 6. Ізотерми, $t = 2,6$ сFig. 6. Isotherms, $t = 2,6$ s

Як можемо бачити з рис. 4–6, на промисловому майданчику дуже швидко формується значна за розмірами зона інтенсивного теплового забруднення, що створює ризик ураження працівників. Наявність захисного бар'єра на промисловому майданчику призводить до суттєвої деформації цієї зони. Дані математичного моделювання показують, що для моменту часу $t = 2,8$ с температура повітря на нав'язному боці захисного бар'єра змінюється від $T_A = 962$ °С в його нижній частині, до $T_A = 1027$ °С у верхній. З іншого боку бар'єра, підвітряного, температура змінюється від $T_B = 728$ °С в нижній частині до $T_B = 963$ °С у верхній.

Далі на рис. 7 показано розподіл температури в середині захисного бар'єра для двох моментів часу: $t = 3,02$ с; $t = 3,78$ с. Розглядаємо переріз бар'єра на висоті 2 м. Точці 0 відповідає нав'язний бік захисного бар'єра.

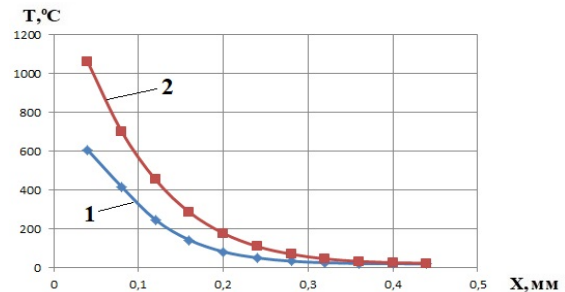


Рис. 7. Розподіл температури в середині захисного бар'єра:

$$1 - t = 3,02 \text{ с}; 2 - t = 3,78 \text{ с}$$

Fig. 7. Temperature distribution inside the protective barrier:

$$1 - t = 3,02 \text{ s}; 2 - t = 3,78 \text{ s}$$

Як можемо бачити з рис. 7, температура в середині бар'єра для вказаних моментів часу не досягає критичного значення, яке потрібне для руйнування конструкції від термічної дії.

Відзначимо, що час розрахунку становив 3 с.

Наукова новизна та практична значимість

Наведено швидкорозрахункову чисельну модель для оцінювання часу руйнування захисного бар'єра на промисловому майданчику, де має місце пожежа. Аналіз теплових полів на промисловому майданчику та в середині захисного бар'єра здійснено шляхом чисельного інтегрування багатofакторного рівняння теплопереносу та теплопровідності. Задачу аеродинаміки розв'язано на базі моделі потенціального руху.

Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для первинної оцінки температурного поля всередині захисного бар'єра з метою визначення її ефективності з точки зору захисту зон від теплового забруднення на промисловому майданчику.

Висновки

У статті розглянуто розв'язання задачі теплопровідності – визначення температури в середині захисного бар'єра, що перебуває під дією теплового навантаження біля місця пожежі.

Розроблені чисельні моделі дають можливість аналізувати теплові поля на промисловому майданчику та динаміку зміни температури в середині захисного бар'єра.

Побудовані чисельні моделі базуються на чисельному інтегруванні рівнянь аеродинаміки, теплопереносу та теплопровідності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е., Тарасенко А. А. *Моделирование пожаров, их обнаружения локализации и тушения*. Харьков : НУГЗУ, 2011. 927 с.
2. Басманов А. Е., Михайлюк А. А., Кулик Я. С. Математическая модель нагрева теплового датчика под тепловым воздействием пожара разлива нефтепродукта. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. Вып. 32. С. 21–25.
3. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.
4. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 6. С. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698>
5. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. *Математичне моделювання в задачах оцінки ризику на потенційно небезпечних об'єктах*. Дніпро : Журфонд, 2021. 270 с.
6. Біляєва В. В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.39.765>
7. Виноградов А. Г. Моделювання процесу формування водяної завіси за допомогою програмного комплексу FlowVision. *Пожезна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць*. 2010. № 6. С. 19–25.
8. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наук. думка, 1997. 368 с.
9. Стоецкий В. Ф., Голинько В. И., Дранишников Л. В. Оценка риска при авариях техногенного характера. *Науковий вісник НГУ*. 2014. № 3. С. 117–124.
10. Biliaiev 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 (Springer)*. 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
11. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. P. 670–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002>
12. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16. Iss. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
13. Matveev Y., Abu-Abad F., Zhironkina O., Zhironkin S. Simulation Modeling of the Process of Danger Zone Formation in Case of Fire at an Industrial Facility. *Fire*. 2024. Vol. 7. Iss. 7. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7070221>
14. Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. P. 773–782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058>
15. Sun S., Gura D., Dong Bo. Fire safety assessment models based on machine learning methods for the coal industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022. Vol. 231. P. 104693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104693>

M. M. BILIAIEV^{1*}, V. V. BILIAIEVA², P. S. KIRICHENKO³, V. A. KOZACHYNA⁴,
V. M. POLTORATSKA⁵

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

²Dep. 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 v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

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

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

⁵Dep. Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38(056) 756 33 71, e-mail poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

Mathematical Modeling of the Process of Non-Stationary Heat Conduction Throughout the Wall

Purpose. Extreme situations at industrial facilities often lead to fires, in particular, fires occur in the event of drone attacks on oil storage facilities. In such cases, a significant amount of chemically hazardous substances (fuel combustion products) are released into the air, posing a risk of thermal injury to workers. Various means and structures are used to reduce the risk of thermal injury. When designing protective structures, it is necessary to determine in advance their effectiveness and the time of possible destruction. This requires the development and use of specialized mathematical models. This work is devoted to the development of numerical models that allow predicting thermal fields at an industrial site in case of fire and assessing the risk of destruction of a protective wall (barrier). **Methodology.** To numerically solve aerodynamic problems (determining the wind speed field), calculate areas of thermal pollution of the air at an industrial site, and determine the dynamics of temperature changes inside a protective barrier (wall), we use fundamental models of continuum mechanics. Finite difference schemes are used for the numerical solution of simulation equations. **Findings.** A computer program has been developed that makes it possible to solve a «coupled» problem of determining the zone of thermal pollution of air at an industrial site and the dynamics of heating of a protective barrier (wall). Using the proposed numerical model and computer program, it is possible to solve the problem of thermal conductivity and heat transfer in real time. **Originality.** A fast-calculation numerical model is presented for estimating the time of destruction of a protective barrier at an industrial site where a fire occurs. The analysis of thermal fields at an industrial site and inside the protective barrier was carried out by numerical integration of a multivariable heat transfer and heat conduction equation. The aerodynamics problem was solved based on a potential motion model. These numerical models require little computer time for practical implementation. **Practical value.** The proposed numerical models can be used for a preliminary assessment of the temperature field inside the protective barrier to determine its effectiveness in terms of protecting areas from thermal pollution at an industrial site. This info can be useful at the preliminary design stage of protective structures.

Key words: protective barrier; temperature field; fire; heat transfer; mathematical modeling; industrial site; occupational safety

REFERENCES

1. Abramov, Yu. A., Basmanov, A. Ye., & Tarasenko, A. A. (2011). *Modelirovanie pozharov, ikh obnaruzheniya lokalizatsii i tusheniya*. Kharkov: NUGZU. (in Russian)
2. Basmanov, A. E., Mykhailiuk, A. O., & Kulik, Y. S. (2012). Mathematical model for temperature sensor heating under thermal impact of fire of the spill. *Fire safety*, 32, 21-25. (in Russian)
3. Basmanov, Ye., & Govalenkov, S. S. (2010). The concentration of hazardous chemicals in the air at a continuous activity of the source. *Problems of Emergency Situations*, 12, 21-27. (in Russian)
4. Biliaiev, M. M., Berlov, O. V., Biliaieva, V. V., & Cherednychenko, L. A. (2020). Risk assessment of thermal damage in the event of emergency burning. *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 6, 54-60. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241120.54.698> (in Ukrainian)
5. Biliaiev, M. M., Kalashnikov, I. V., Biliaieva, V. V., Kozachyna, V. A., & Berlov, O. V. (2021). *Matematychni modeliuvannia v zadachakh otsinky ryzyku na potentsiino nebezpechnykh ob'ektakh*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)

6. Biliaieva, V. (2021). Mathematical models application to predict heat and chemical air pollution in working areas. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 3, 39-45.
DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.010721.39.765> (in Ukrainian)
7. Vynogradov, A. Gh. (2010). Modeljuvannja procesu formuvannja vodjanoji zavyzy za dopomoghoju programnogho kompleksu FlowVision. *Pozhezhna bezpeka: teorija i praktyka: Zbirnyk naukovykh pracj*, 6, 19-25. (in Ukrainian)
8. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovani-erasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
9. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I. & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 117-124. (in Russian)
10. 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)
11. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., & El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 670-685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002> (in English)
12. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
13. Matveev, Y., Abu-Abed, F., Zhironkina, O., & Zhironkin, S. (2024). Simulation Modeling of the Process of Danger Zone Formation in Case of Fire at an Industrial Facility. *Fire*, 7(7), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7070221> (in English)
14. Paula, H. M. (2023). Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 773-782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058> (in English)
15. Sun, S., Gura, D., & Dong, B. (2022). Fire safety assessment models based on machine learning methods for the coal industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 231, 104693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104693> (in English)

Надійшла до редколегії: 13.05.2025

Прийнята до друку: 09.09.2025

УДК 556.3:[536.24:519.6]

О. А. БУБНОВА¹, В. А. МІРОШНИК², Р. В. МАРКУЛЬ³, П. Б. МАШИХІНА^{4*},
О. В. БЕРЛОВ⁵

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 654 44 40, ел. пошта bubnova@nas.gov.ua, ORCID 0000-0001-6064-5204

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

³Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта guarangamr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7630-8963

^{4*}Каф. «Гідраліка, 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

⁵Каф. «Охорона праці, цивільна та техногенна безпека», 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

Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах: прикладні аспекти

Мета. Утилізація рідинних відходів є актуальною проблемою в багатьох країнах світу. Найбільш широко поширеним засобом їх утилізації є створення ставків-відстійників. Але при такому підході значна кількість земельних ресурсів «виводиться» з користування та у поєднанні з інтенсивним забрудненням зони аерації та ґрунтових вод, що широко використовуються для водопостачання в сільських районах. Тому постійно здійснюються пошук альтернативних методів утилізації рідинних відходів для кожного конкретного регіону. Одним з шляхів утилізації рідинних відходів, що часто використовується, зокрема, за кордоном, є підземне заховання відходів. Такий підхід може бути дуже ефективним та не шкодить навколишньому середовищу, якщо є відповідні гідрологічні умови в регіоні, а саме підземні горизонти, що розташовані глибоко та містять некондиційні підземні води. Використання такого підходу потребує використання спеціалізованих математичних моделей. Метою роботи є розробка швидкорозрахункових математичних моделей для оцінювання впливу підземного заховання рідинних стоків на забруднення підземних вод. **Методика.** Для рішення задач масопереносу домішки в підземному водоносному горизонті використовується рівняння масопереносу. Для моделювання динаміки ґрунтових вод використовується планова модель фільтрації. Для опису процесу геоміграції використовується двовимірне рівняння масопереносу. Процес теплового забруднення ґрунтових вод моделюється на базі рівняння енергії. Для чисельного інтегрування рівняння фільтрації використовується явна різницева схема. Чисельне інтегрування моделюючого рівняння масопереносу та енергії здійснюється на базі змінно-трикутної схеми розщеплення. **Результати.** Розглянуто побудову математичних моделей тепломасопереносу, що дозволяють оцінювати динаміку зміни режиму ґрунтових вод та процесів тепломасопереносу при підземному захованні рідинних відходів. **Наукова новизна.** Розглянуто побудову чисельних моделей для аналізу впливу підземного заховання рідинних відходів на підземні води. Чисельні моделі враховують конвективно-дифузійний процес поширення домішки та зміну теплового режиму в ґрунтових водах. **Практична значимість.** Розглянуті математичні моделі можуть бути використані при проектуванні систем підземного заховання рідинних відходів.

Ключові слова: динаміка підземних вод; тепломасоперенос в підземних водах; полігон відходів; підземне заховання відходів; математичне моделювання

Вступ

Зміна режиму руху підземних вод та їх якісних показників може мати різні сценарії при антропогенній дії, наприклад, при створенні полігонів для рідинних відходів (рис. 1), розта-

шуванні свердловин для систем водопостачання (рис. 2), дренажу територій, де має місце підтоплення (рис. 3).



Рис. 1. Полігон для рідинних відходів (Google Maps)

Fig. 1. Liquid waste landfill (Google Maps)



Рис. 2. Свердловина системи водопостачання (https://kievbur.com.ua/uk/)

Fig. 2. Water supply system well (https://kievbur.com.ua/uk/)

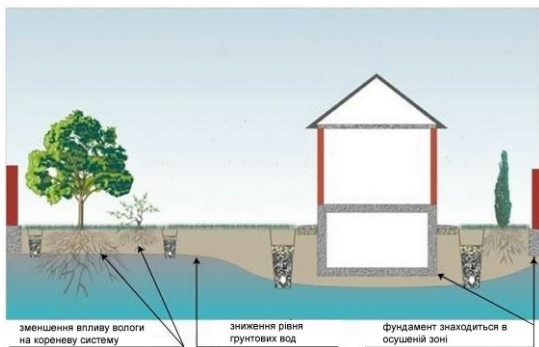


Рис. 3. Дренаж підтопленої території

Fig. 3. Drainage of flooded territory

Тому при проектуванні полігонів для складування відходів, ділянок для підземного заховання рідинних відходів, проектування систем водозабору з підземних джерел та створення системи дренажу на підтоплених територіях потрібно заздалегідь визначати зміну рівня ґрунтових вод, а також зміну їх якісних показників. Ефективним інструментом рішення таких задач є використання методу математичного моделювання [3, 6, 8, 9, 12]. Аналіз літературних джерел показує, що на практиці найчастіше використовуються емпіричні моделі, аналітичні моделі та чисельні моделі [1, 2, 4, 5, 7, 10, 11]. В багатьох країнах світу аналіз динаміки підземних вод здійснюється за допомогою пакету програм MODFLOW [5, 8, 10], що реалізує чи-

сельні моделі фільтрації та геоміграції. Але зараз існує певний дефіцит розрахункових методів для аналізу багатофакторних процесів динаміки підземних вод, що вказує на актуальність створення ефективних математичних моделей в задачах фільтрації та геоміграції.

Мета

Метою статті є розробка Screening Models для чисельного розв'язання задач в галузі динаміки ґрунтових вод та тепломасопереносу в підземних водах.

Методика

Розглядається рішення задач тепломасопереносу в підземних водах. Відомо, що для рішення задач даного класу потрібно:

1) розрахувати поле швидкості підземного потоку при роботі дренажу, свердловин систем водопостачання, інфільтрації стоків з полігонів відходів тощо (перший етап);

2) розв'язати задачу тепломасопереносу в підземних водах (другий етап).

Розглянемо математичні моделі, що використовуються для рішення задач на кожному етапі.

Для рішення задачі фільтрації в безнапірному потоці ґрунтових вод (водотрив – горизонтальний) використовується наступне рівняння:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right) + \sum W_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

де h – глибина потоку; k – коефіцієнт фільтрації; μ – водовіддача; h_m – середня глибина потоку; W_i – інтенсивність інфільтрації води в потік; x_i, y_i – координати свердловин (полігону).

Відзначимо, що « $+W$ » відповідає подачі води в підземний потік, при « $-W$ » має місце виток води з підземного горизонту.

Моделювання динаміки підземного потоку здійснюється в області, що має прямокутну форму. Для рівняння (1) динаміки руху безнапірних підземних вод реалізуються такі крайові умови:

1. При $t = 0$ задається рівень ґрунтових вод в області дослідження.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

2. На межі, де потік входить в область дослідження, задається значення глибини $h = h_1$, де h_1 – відома глибина потоку підземних вод.

3. На межі, де потік виходить з області дослідження, задається значення глибини $h = h_2$, де h_2 – відома глибина потоку.

4. На бічних сторонах розрахункової області реалізується гранична умова $\partial h / \partial n = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до межі.

Компоненти швидкості підземного потоку визначаються на базі закону Дарсі:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, v = -k \frac{\partial h}{\partial y},$$

де k – коефіцієнт фільтрації.

Для чисельного розв'язання моделюючого рівняння (1) використовується прямокутна різницева сітка. Значення функції h розраховується всередині різницевих комірок.

Для розв'язку моделюючого рівняння (1) здійснюється його розщеплення:

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

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \sum W_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (3)$$

Чисельне рішення рівняння (2) здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Розрахункова залежність для визначення глибини потоку має вигляд:

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

де $a = \frac{kh_m}{\mu}$.

Для чисельного інтегрування рівняння (3) використовується метод Ейлера. Розрахункова залежність має вигляд:

$$h^{n+1} = h^n + \frac{\Delta t}{\mu} \sum W \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (5)$$

Після визначення поля функції h в області дослідження визначаються компоненти вектора швидкості потоку на базі залежностей:

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

Процес теплопереносу в підземних водах моделюється наступним рівнянням (рівняння енергії):

$$n \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_T \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \quad (6)$$

де a_x, a_y – коефіцієнти температуропровідності; u, v – проекції вектора швидкості фільтрації на осі Декартової системи координат; n – пористість; Q_T – інтенсивність джерела емісії тепла; t – час; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака.

Для рівняння енергії (6) ставляться такі граничні умови:

1) на вході в розрахункову область: $T = T_{in}$, де T_{in} – відома температура;

2) на виході з розрахункової області:

$$T(i+1, j) = T(i, j),$$

де $T(i+1, j)$ – температура підземного потоку в останній обчислювальній комірці; $T(i, j)$ – температура в попередній обчислювальній комірці.

3) на твердих поверхнях:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0,$$

де n – одинична нормаль до твердої поверхні.

Для рівняння теплопереносу ставиться початкова умова: при $t = 0$ $T = T_0$, T_0 – відома температура води.

Для аналізу процесу поширення домішки в підземних водах використовується 2D рівняння масопереносу:

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де C – концентрація домішки; u, v – проекції вектору швидкості фільтрації на вісі Декартової системи координат; μ_x, μ_y – коефіцієнти дисперсії; t – час; Q – інтенсивність емісії домішки; $\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака.

Для рівняння масопереносу ставляться такі граничні умови:

- 1) на вході в розрахункову область: $C = C_{in}$, де C_{in} – відома концентрація домішки;
- 2) на виході з розрахункової області:

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

де $C(i+1, j)$ – концентрація домішки в останній обчислювальній комірці; $C(i, j)$ – концентрація домішки в попередній обчислювальній комірці.

- 3) на твердих поверхнях:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де n – одинична нормаль до твердої поверхні.

Для рівняння масопереносу ставиться початкова умова: при $t = 0$ $C = C_0$, C_0 – відома концентрація домішки.

Для чисельного інтегрування рівняння (7) використовується наступна схема розщеплення:

- перший крок ($k = 1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \quad (8) \end{aligned}$$

- другий крок ($k = n+1/2$; $c = n+1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \quad (9) \end{aligned}$$

- третій крок ($k = n+3/4$; $c = n+1/2$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + \\ + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \quad (10) \end{aligned}$$

- четвертий крок ($k = n+1$; $c = n+3/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \quad (11) \end{aligned}$$

де L_x, L_y, \dots – різницеві оператори, пояснення для яких наведено в [1].

Чисельне інтегрування рівняння теплопереносу (6) здійснюється аналогічно, використовуючи залежності (8)–(11).

Результати

Далі наведено результати обчислювального експерименту. Розглядається процес скиду забруднених стічних вод в підземний водоносний горизонт. Розрахунок було проведено при таких даних:

1. Скид здійснюється через дві свердловини (перший сценарій) та три свердловини (другий сценарій).

2. Інтенсивність скиду $W = 1$ (безрозмірне значення).

3. Глибина потоку на початку розрахункової області $h = 14$ м.

4. Глибина потоку в кінці розрахункової області $h = 13,6$ м.

5. Коефіцієнт фільтрації водоносного шару 5 м/доб.

6. Порозність 0,3.

7. Фонова концентрація домішки в підземному горизонті $C = 0$.

8. Довжина розрахункової області $L_x = 1$ (безрозмірне значення).

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. Ширина розрахункової області $L_y = 0,5$ (безрозмірне значення).

Далі на рисунках показано динаміку розвитку областей забруднення в підземному водоносному горизонті для різних моментів часу.

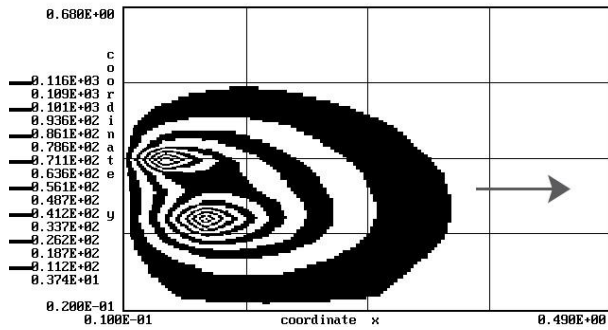


Рис. 4. Поле концентрації домішки в підземному потоці, $t = 0,17$ (сценарій № 1)

Fig. 4. Field of impurity concentration in underground flow, $t = 0.17$ (scenario No. 1)

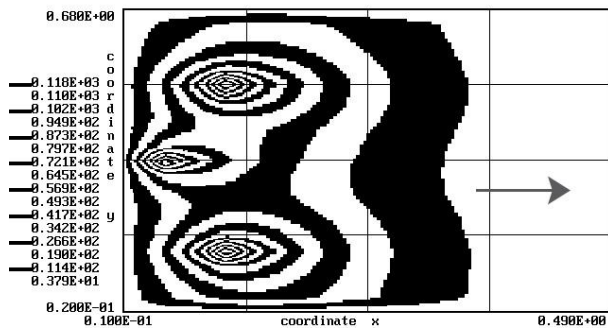


Рис. 5. Поле концентрації домішки в підземному потоці, $t = 0,17$ (сценарій № 2)

Fig. 5. Field of impurity concentration in underground flow, $t = 0.17$ (scenario No. 2)

Аналіз даних, що наведені на рис. 4–5, показує, що біля свердловин формуються зони з високим градієнтом концентрації домішки, що

обумовлено швидкою зміною поля швидкості потоку. Також можна бачити, як формуються області взаємовпливу свердловин. Концентрація домішки поступово зменшується при віддаленні від свердловин, що здійснюють закачування рідинних відходів в підземний горизонт.

Таким чином, розглянута чисельна модель дає можливість визначити розміри, форму та інтенсивність областей забруднення в підземному горизонті.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано комплекс чисельних моделей для проведення обчислювального експерименту по дослідженню багатofакторних процесів фільтрації та тепломасопереносу в безнапірному потоці ґрунтових вод.

Побудовані чисельні моделі можуть бути використані на етапі ескізного проектування систем дренажу, водопостачання; аналізу процесів геоміграції при інфільтрації забруднювачів з полігонів відходів в підземний водоносний горизонт.

Висновки

1. Розглянуто побудову чисельної моделі для рішення задачі фільтрації в безнапірному водоносному горизонті.

2. Розглянуто побудову чисельних моделей для розрахунку процесу тепломасопереносу в потоці ґрунтових вод.

3. Для побудови чисельних моделей використано явні схеми, що дозволяє реалізувати просту програмну реалізацію моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Кошляков О. С., Мокієнко В. І. *Практикум з динаміки підземних вод*. Київ : Київський національний університет імені Т. Шевченка, 2006. 77 с.
3. AL-Hashmi, S. S. S. *Numerical simulation of groundwater flow and nitrate transport in Wadi Samail Catchment. A thesis for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering*. Oman : Sultan Qaboos University, 2020. 116 p.
4. Ger M., Baran O. U., Manogl B. Numerical simulation of groundwater contamination. *Hydraulic Engineering Software*. 2000. № VIII. P. 337–352.

5. Harbaugh A. W. *MODFLOW-2005 : the U. S. Geological Survey modular ground-water model – the ground-water flow process*. USA : U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2005. 253 p.
DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6A16>
6. Koohestani N., Halaghi M. M., Dehghani A. A. Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (a Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 2013. № 8. P. 858–873.
7. Masood Z. B., Abd Ali Z. T. Numerical modeling of two-dimensional simulation of groundwater protection from lead using different sorbents in permeable barriers. *Environmental Engineering Research*. 2019. Vol. 25(4). P. 605–613. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.237>
8. Pilechi A., Mohammadian A., Murphy E. A numerical framework for modeling fate and transport of microplastics in inland and coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 184. P. 1–15.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114119>
9. Sherzod D., Abdullaeva B., Kubyasev K., Abdullaev O. Numerical study of filtration process of ground and pressure waters in multilayer porous media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 896. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012069>
10. Tizro A. T., Sarhadi B., Mohamadi M. MODFLOW/MT3DMS based modeling of leachate pollution transfer in solid waste disposal of Bahar plain deep aquifer. *Iranian Journal of Health Sciences*. 2018. 6(2). P. 11–30.
DOI: <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i2.46>
11. Wali S. U., Umar K. J., Abor I. G. Modelling Flow And Fate Of Contaminants In Groundwater Using A Version Of The Five Steady-State Pollutant Transport Models. *Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics*. 2021. Vol. 1(1). P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.55529/jecnam.11.1.30>
12. Zio S., Lamien B., Beidari M., Inoussa T. Numerical simulation of pollutants transport in groundwater using deep neural networks informed by physics. *Gulf Journal of Mathematics*. 2024. Vol. 16(2). P. 315–323.
DOI: <https://doi.org/10.56947/gjom.v16i2.1863>

O. A. BUBNOVA¹, V. A. MIROSHNYK², R. V. MARKUL³, P. B. MASHYKHINA^{4*},
O. V. BERLOV⁵

¹M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 654 44 40, e-mail bubnova@nas.gov.ua, ORCID 0000-0001-6064-5204

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

³Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail guarangamr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7630-8963

^{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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁵Dep. of 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 0000-0002-7442-0548

Modelling of Filtration and Heat and Mass Transfer Processes in Groundwater: Applied Aspects

Purpose. Liquid waste disposal is an urgent problem in many countries around the world. The most widely used method of liquid waste disposal is the creation of sedimentation ponds. However, this approach takes a significant amount of land out of use and, in combination with intensive pollution of the aeration zone and groundwater, is widely used for water supply in rural areas. Therefore, alternative methods of liquid waste disposal are constantly being sought for each specific region. One of the ways to dispose of liquid waste that is often used, in particular abroad, is underground disposal. This approach can be very effective and environmentally friendly if there are suitable hydrological conditions in the region, namely deep underground horizons containing substandard groundwater. This approach requires the use of specialised mathematical models. The aim of this study is to develop fast-calculating mathematical models for assessing the impact of underground disposal of liquid wastewater on groundwater pollution. **Methodology.** The mass transfer equation is used to solve the problems of mass transfer of impurities in the underground aquifer. A planned filtration model is used to model groundwater dynamics. A two-dimensional mass transfer equation is used to describe the geomigration process. The process of thermal contamina-

tion of groundwater is modeled on the basis of the energy equation. An explicit difference scheme is used to numerically integrate the filtration equation. Numerical integration of the modeling equation of mass transfer and energy is carried out on the basis of a variable-triangular splitting scheme. **Findings.** The development of mathematical models of heat and mass transfer, which allow to estimate the dynamics of changes in the groundwater regime and heat and mass transfer processes during underground disposal of liquid waste, is considered. **Originality.** The article considers the development of numerical models for analyzing the impact of underground disposal of liquid waste on groundwater. Numerical models take into account the convective-diffusion process of impurity propagation and changes in the thermal regime in groundwater. **Practical value.** The considered mathematical models can be used in the design of underground liquid waste disposal systems.

Keywords: groundwater dynamics; heat and mass transfer in groundwater; landfill; underground disposal of waste; mathematical modeling

REFERENCES

- Zghurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Beliaev, N. N. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyev: Naukova dumka. (in Russian)
- Koshlyakov, O. E., & Mokienko, V. I. (2006). *Workshop on the dynamics of groundwater*. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. (in Ukrainian)
- AL-Hashmi, S. S. S. (2020). *Numerical simulation of groundwater flow and nitrate transport in Wadi Samail Catchment*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Oman: Sultan Qaboos University. (in English)
- Ger, M., Baran, O. U., & Manogl, B. (2000). Numerical simulation of groundwater contamination. *Hydraulic Engineering Software, VIII*, 337-352. (in English)
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005: the U. S. Geological Survey modular ground-water model - the ground-water flow process*. USA: U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6A16> (in English)
- Koohestani, N., Halaghi, M. M., & Dehghani, A. A. (2013). Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (a Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 8*, 858-873. (in English)
- Masood, Z. B., & Abd Ali, Z. T. (2019). Numerical modeling of two-dimensional simulation of groundwater protection from lead using different sorbents in permeable barriers. *Environmental Engineering Research, 25*(4), 605-613. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.237> (in English)
- Pilechi, A., Mohammadian, A., & Murphy, E. (2022). A numerical framework for modeling fate and transport of microplastics in inland and coastal waters. *Marine Pollution Bulletin, 184*, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114119> (in English)
- Sherzod, D., Abdullaeva, B., Kubyasev, K., & Abdullaev, O. (2020). Numerical study of filtration process of ground and pressure waters in multilayer porous media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 896*, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012069> (in English)
- Tizro, A. T., Sarhadi, B., & Mohamadi, M. (2018). MODFLOW/MT3DMS based modeling of leachate pollution transfer in solid waste disposal of Bahar plain deep aquifer. *Iranian Journal of Health Sciences, 6*(2), 11-30. DOI: <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i2.46> (in English)
- Wali, S. U., Umar, K. J., & Abor, I. G. (2021). Modelling Flow and Fate of Contaminants in Groundwater Using a Version of the Five Steady-State Pollutant Transport Models. *Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics, 1*(1), 1-30. DOI: <https://doi.org/10.55529/jecnam.11.1.30> (in English)
- Zio, S., Lamien, B., Beidari, M., & Inoussa, T. (2024). Numerical simulation of pollutants transport in groundwater using deep neural networks informed by physics. *Gulf Journal of Mathematics, 16*(2), 315-323. DOI: <https://doi.org/10.56947/gjom.v16i2.1863> (in English)

Надійшла до редколегії: 01.05.2025

Прийнята до друку: 15.09.2025

UDC 628.35:519.6

O. O. MEDVEDIEVA¹, S. V. DZIUBA², O. L. TIUTKIN^{3*}, P. B. MASHYKHINA⁴,
O. V. BERLOV⁵

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

²M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (067) 257 50 44, e-mail sergejdzuba@gmail.com, ORCID 0000-0002-3139-2989

^{3*}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 0000-0003-4921-475

⁴Dep. «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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁵Dep. «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 0000-0002-7442-0548

Modeling of Filtration and Geomigration Under Anthropogenic Impact on Groundwater

Purpose. One of the most widespread methods of liquid waste disposal is the use of settling ponds. Wastewater in such lagoons eventually infiltrates into the aeration zone and reaches groundwater. Thus, a chemical contamination area is formed both in the aeration zone and in groundwater. When reengineering sedimentation ponds (for example, when increasing the height of the dam), there is an increase in the pressure in the structure, which will affect the intensity of infiltration of wastewater from the pond into the aeration zone), it is necessary to determine the change in the intensity of environmental pollution in advance. To solve such a forecasting problem, it is necessary to use specialized mathematical models. The aim of the study is to develop numerical models for assessing the dynamics of aeration zone pollution during the infiltration of liquid waste from a sedimentation pond. **Methodology.** The Laplace equation for the head is used to solve the filtration problem. The process of mass transfer of impurities in the aeration zone is modeled using the mass transfer equation, which takes into account the convective-dispersive transfer of impurities. The numerical integration of the modeling equations is carried out using finite-difference schemes. **Findings.** Numerical models of filtration and mass transfer are considered, which allow to estimate the dynamics of changes in the contamination area in the aeration zone during the infiltration of liquid wastewater from a sedimentation pond. **Originality.** The construction of mathematical models for analyzing the infiltration of liquid wastewater from a sedimentation pond is considered. Numerical models take into account the convective-dispersion process of impurity propagation in the aeration area. **Practical value.** The considered numerical models can be used to assess the environmental impact of sedimentation ponds used for the accumulation of liquid waste.

Keywords: geomigration; filtration; mass transfer; sedimentation pond; mathematical modeling

Introduction

Settling ponds containing liquid waste have a significant negative impact on the subsoil and groundwater. This is due to the filtration of liquid waste through the aeration zone into groundwater. As a result, a halo of heavily contaminated groundwater is formed in the area of influence of the settling pond. Over time, this contamination zone migrates and reaches water sources and surface water bodies. Thus, the disposal of liquid waste by discharging it into sedimentation ponds requires a scientific justification for such waste management and determination of the extent of groundwater contamination.



Fig. 1. Settling pond
(<https://cutt.ly/8rTpoWyJ>)

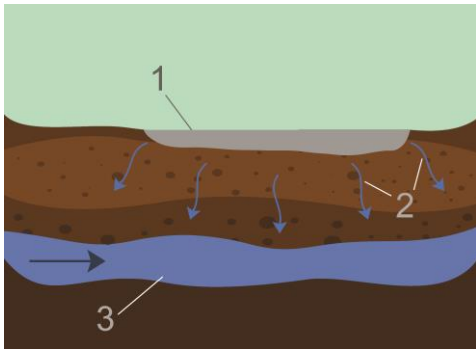


Fig. 2. Groundwater contamination due to wastewater infiltration:

1 – settling pond; 2 – filtration; 3 – ground water

The analysis of literature sources has shown that the following methods are used to study the processes of filtration and geomigration under the influence of anthropogenic factors:

1. *Physical experiment* (Fig. 3). The purpose of the physical experiment is to determine the hydrodynamic and physicochemical parameters of migration [7, 8].



Fig. 3. Preparation of equipment in the field [5]

These parameters are used to predict the hydrogeological situation.

Field measurements are used to monitor groundwater near large sources of pollution, but this requires a significant number of observation wells (Fig. 4).



Fig. 4. Wells in the study area [8]

2. *Mathematical modeling* makes it possible to quickly obtain predictive data on changes in groundwater dynamics and the level of their pollution under various types of anthropogenic load. For theoretical problem solving, it is used:

– *empirical models* based on the processing of field observations and physical experiment results [3];

– *analytical models* are computational relationships that are an exact solution to the filtration or mass transfer equations [3];

– *numerical models* are built by applying various approximate (numerical) methods for solving boundary value problems of filtration and geomigration [1, 2, 4–12]. A significant number of numerical models are implemented in the form of commercial software products (e.g., MODFLOW, COMSOL [6, 10, 11]).

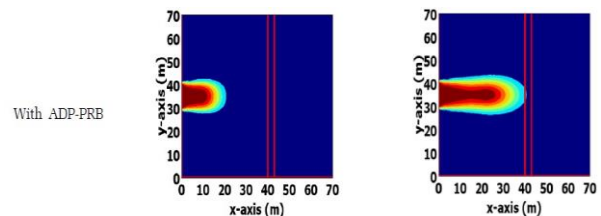


Fig. 5. Groundwater contamination area modeled using COMSOL code [12]

The use of numerical modeling to solve geomigration problems is a major trend in solving geomigration problems.

Purpose

The aim of the article is to develop fast numerical models for analyzing the dynamics of groundwater contamination during the infiltration of contaminated water from a sedimentation pond into an aquifer.

Methodology

The paper deals with the problem of wastewater filtration from a settling pond through an aeration zone. It is assumed that a stable hydraulic connection has been established between the water in the pond and groundwater.

To solve the problem of wastewater filtration through the aeration zone, the following filtration equation is used:

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

where H is the hydraulic head.

The components of the groundwater flow rate are determined on the basis of Darcy's law:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} = 0,$$

where k is the filtration coefficient.

At $t = 0$ the groundwater level in the study area and the water level in the settling pond are set.

The boundary condition $\frac{\partial H}{\partial n} = 0$ is implemented on the sides of the computational domain, where n is a unit vector of the external normal to the boundary.

To build a numerical model of the process, the filtration equation (1) is used:

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

where t – a fictitious time.

The two-stage difference splitting scheme for (2) is written as follows (conditional approximation scheme):

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_{i,j}^n}{\Delta t} &= \\ &= \left[\frac{-H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \\ \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \\ &= \left[\frac{H_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{H_{i,j+1}^{n+1} - H_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (3) \end{aligned}$$

At each stage, the value of the velocity potential is determined by an explicit formula.

Also, for the numerical integration of equation (20), another splitting scheme is used. At the first stage, the geometric splitting of equation (2) is performed:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}.$$

Next, the following dependence is used to determine the unknown value of the head based on the first equation from this system:

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

To determine the unknown value of the head based on the second equation, the following relationship is used:

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

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

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

The calculation based on the considered dependencies ends when the condition is fulfilled:

$$|H_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n| \leq \varepsilon,$$

where ε – a small number; n – an iteration number.

The values of the components of the filtration flow velocity vector are used to solve the problem of mass transfer of an impurity from the pond to groundwater. The following equation is used to model the mass transfer process:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

where C – impurity concentration; μ_x, μ_y – dispersion coefficients; n – porosity; u, v – components of the filtration flow velocity vector; t – time.

Boundary conditions for equation (4):

1) at the entrance to the computational domain:

$$C = C_{(in)},$$

where $C_{(in)}$ – known concentration of the impurity, i.e., the concentration of the impurity in the settling pond;

2) at the outlet of the calculation area:

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

where $C(i+1, j)$ is the concentration of the impurity in the last computational cell; $C(i, j)$ is the concentration of the impurity in the previous computational cell.

3) on the sides of the computational domain:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

where n – the unit normal to the solid surface.

For equation (4), the initial condition is set: at $t = 0$ $C = C_{(0)}$, $C_{(0)}$ – impurity concentration in the pond.

To numerically solve equation (4), the following splitting is performed:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

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

The following dependencies are used for the numerical integration of equation (5):

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

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

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

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

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

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

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

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

The variable-triangular splitting scheme for equation (5) is written as follows:

– first step:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0; \quad (7)$$

– second step:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0. \quad (8)$$

The unknown value of C in each equation is determined by the «running calculation» formula.

For the numerical integration of (6), we use the total approximation scheme:

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

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

where it is assumed that $\Delta t = \frac{\Delta t}{n}$.

The unknown value of the impurity concentration is determined from these dependencies by an explicit formula.

Another splitting scheme is also used for the numerical integration of equation (4):

– first step ($k = 1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) &= \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n); \end{aligned}$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

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

– third step ($k = n+3/4$; $c = n+1/2$):

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

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

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

At each splitting step, the unknown value of the impurity concentration is determined using an explicit formula.

Findings

The considered numerical models were used to simulate the infiltration of wastewater from the pond. It is assumed that the wastewater contains chlorides, the concentration of which in the pond is $C_0 = 1$ (in a dimensionless form). The calculation was performed with the following data:

1. The head at the beginning of the calculation area $h = 0.2$ (in dimensionless form).
4. The head at the end of the calculation area $h = 0.02$ (in dimensionless form).
3. The filtration coefficient in the aeration zone is 2 m/day.
4. Porosity 0.2.
5. Background concentration of impurities in the aeration zone $C = 0$.
6. Length of the computational domain $L_x = 1$ (dimensionless value)
7. Width of the computational domain $L_y = 0.5$ (dimensionless value)

The following figures show the dynamics of the development of pollution areas in the aeration area for different moments of time. The concentration and time values are given in a dimensionless form.

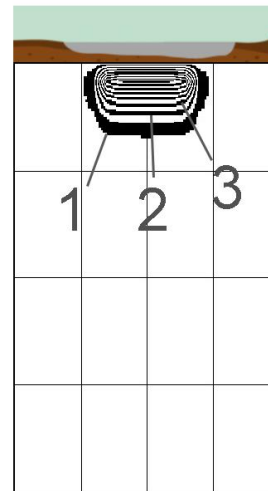


Fig. 6. Contamination area in the aeration zone, $t = 0.03$:
1 – $C = 0.12$; 2 – $C = 0.23$; 3 – $C = 0.34$

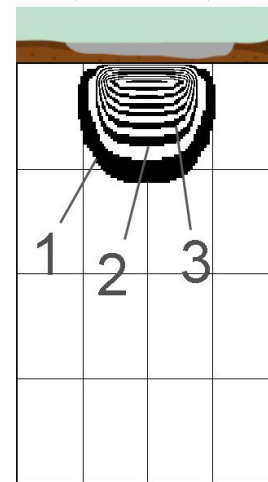


Fig. 7. Area of contamination in the aeration zone,
 $t = 0.05$:
1 – $C = 0.14$; 2 – $C = 0.24$; 3 – $C = 0.35$

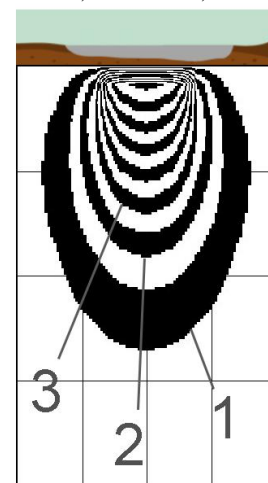


Fig. 8. Pollution area in the aeration zone, $t = 0.09$:
1 – $C = 0.13$; 2 – $C = 0.23$; 3 – $C = 0.34$

The analysis of the data shown in Figs. 4-6 shows that the contamination area significantly increases in width, which is due to the dispersion process. The contamination area looks like a «tongue».

Thus, the considered numerical model makes it possible to determine the size, shape, and intensity of the contamination areas in the aeration zone.

Originality and practical value

Numerical models of infiltration of wastewater from a sedimentation pond through the aeration zone into the groundwater flow are considered. The models are based on the use of the splitting method for the filtration and mass transfer equations. The calculation of unknown parameters is based on explicit difference dependencies, which

makes it possible to implement numerical models in a simple programmatic manner.

The considered numerical models can be used for rapid assessment of the impact of wastewater settling ponds on groundwater pollution.

Conclusions

1. The development of a numerical model for solving the problem of filtration of wastewater from a sedimentation pond is considered.

2. The development of numerical models for calculating the process of mass transfer of impurities in the filtration flow is considered.

3. The results of a computational experiment to determine the dynamics of groundwater pollution during the infiltration of wastewater from a sedimentation pond are presented.

LIST OF REFERENCES

1. Біляєв М. М., Козачина В. В. Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 3(107). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313664>
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Біляєв М. М. *Чисельне моделювання розповсюдження забруднення в наволинському середовищі*. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Кошляков О. Є., Мокієнко В. І. *Практикум з динаміки підземних вод*. Київ : Київський національний університет імені Т. Шевченка, 2006. 77 с.
4. Harbaugh A. W. *MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process*. USA : U.S. Geological Survey, 2005. 253 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6a16>
5. Klankaew P., Pochai N. A Numerical Groundwater Quality Assessment Model Using the Cubic Spline Method. *AENG International Journal of Applied Mathematics*. 2024. Vol. 54. Iss. 1. P. 111–116.
6. Koohestani N., Halaghi M. M., Dehghani A. A. Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (a Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 2013. Vol. 1. Iss. 8. P. 858–873.
7. Masood Z. B., Abd Ali Z. T. Numerical modeling of two-dimensional simulation of groundwater protection from lead using different sorbents in permeable barriers. *Environmental Engineering Research*. 2019. Vol. 25(4). P. 605–613. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.237>
8. Persson J., Andersson N. *Modeling groundwater flow and PFOS transport: A case study at the old fire drill site of Bromma Stockholm Airport. Degree project in the field of technology energy and environment and the main field of study environmental engineering*. Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 2016. 98 p.
9. Sharifa Said Shinoon Al Hashmi. *Numerical simulation of groundwater flow and nitrate transport in Wadi Samail Catchment : a thesis for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering*. Oman: Sultan Qaboos University, 2020. 116 p.
10. Tizro A. T., Sarhadi B., Mohamadi M. MODFLOW/MT3DMS based modeling of leachate pollution transfer in solid waste disposal of Bahar plain deep aquifer. *Iranian Journal of Health Sciences*. 2018. Vol. 6. Iss. 2. P. 11–30. DOI: <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i2.46>
11. Wali S., Umar K., Abor I. G. Modelling Flow And Fate Of Contaminants In Groundwater Using A Version Of The Five Steady-State Pollutant Transport Models: A Status-Review. *Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics*. 2021. Vol. 1(1). P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.55529/jecnam.11.1.30>
12. Zio S., Lamien B., Beidari M., Inoussa T. Numerical simulation of pollutants transport in groundwater using deep neural networks informed by physics. *Gulf Journal of Mathematics*. 2024. Vol. 16. Iss. 2. P. 337–352. DOI: <https://doi.org/10.56947/gjom.v16i2.1863>

О. О. МЕДВЕДЄВА¹, С. В. ДЗЮБА², О. Л. ТЮТКІН^{3*}, П. Б. МАШИХІНА⁴,
О. В. БЕРЛОВ⁵

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

²Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 257 50 44, ел. пошта sergejdzuba@gmail.com, ORCID 0000-0002-3139-2989

^{3*}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

⁴Каф. «Гідраліка, 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

⁵Каф. 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

Моделювання фільтрації та геоміграції при техногенному впливу на ґрунтових води

Мета. Одним з широко розповсюджених методів утилізації рідинних відходів є використання ставків-відстійників. Стічні води в таких відстійниках з часом інфільтруються в зону аерації та досягають ґрунтових вод. Таким чином, формується область хімічного забруднення як в зоні аерації, так і в ґрунтових водах. При реінжинірингу ставків-відстійників (наприклад, при нарощуванні висоти дамби) має місце збільшення напору в споруді, що вплине на інтенсивність інфільтрації стоків зі ставка в зону аерації) потрібно заздалегідь визначити зміну інтенсивності забруднення довкілля. Для рішення такої прогнозовної задачі необхідним є використання спеціалізованих математичних моделей. Метою роботи є розробка чисельних моделей для оцінювання динаміки забруднення зони аерації при інфільтрації рідинних відходів зі ставка-відстійника. **Методика.** Для рішення задачі фільтрації використовується рівняння Лапласа для напору. Процес масопереносу домішки в зоні аерації моделюється з використанням рівняння масопереносу, що враховує конвективно-дисперсійний перенос домішки. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь здійснюється за допомогою кінцево-різницевого схем. **Результати.** Розглянуто чисельні моделі фільтрації та масопереносу, що дозволяють оцінювати динаміку зміни області забруднення в зоні аерації при інфільтрації рідинних стоків зі ставка-відстійника. **Наукова новизна.** Розглянуто побудову математичних моделей для аналізу інфільтрації рідинних стоків зі ставка-відстійника. Чисельні моделі враховують конвективно-дисперсійний процес поширення домішки в області аерації. **Практична значимість.** Розглянуті чисельні моделі можуть бути використані для оцінювання впливу на довкілля ставків-відстійників, що використовуються для накопичування рідинних відходів.

Ключові слова: геоміграція; фільтрація; масоперенос; ставок-відстійник; математичне моделювання

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. V. (2024). Modeling of filtration and heat and mass transfer processes in groundwater. *Science and progress of transport*, 3(107). 5-14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313664> (in Ukrainian)
2. Zgurovsky, M. Z., Skopetsky, V. V., Khutch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Numerical modeling of pollution spreading in the environment*. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian)
3. Koshlyakov, O. E., & Mokienko, V. I. (2006). *Workshop on the dynamics of groundwater*. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. (in Ukrainian)
4. Harbaugh, A. W (2005). *MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process*. USA: U.S. Geological Survey. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6a16> (in English)
5. Klankaew, P., & Pochai, N. (2024). A Numerical Groundwater Quality Assessment Model Using the Cubic Spline Method. *AENG International Journal of Applied Mathematics*, 54(1), 111-116. (in English)
6. Koohestani, N., Halaghi, M. M., & Dehghani, A. A. (2013). Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (a Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 8, 858-873. (in English)

7. Masood, Z. B., & Abd Ali, Z. T. (2019). Numerical modeling of two-dimensional simulation of groundwater protection from lead using different sorbents in permeable barriers. *Environmental Engineering Research*, 25(4), 605-613. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.237> (in English)
8. Persson, J., & Andersson, N. (2016). *Modeling groundwater flow and PFOS transport: A case study at the old fire drill site of Bromma Stockholm Airport*. Degree project in the field of technology energy and environment and the main field of study environmental engineering, Sweden: KTH Royal Institute of Technology. (in English)
9. Sharifa Said Shinoon Al Hashmi (2020). *Numerical simulation of groundwater flow and nitrate transport in Wadi Samail Catchment*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Oman: Sultan Qaboos University. (in English)
10. Tizro, A. T. Sarhadi, B., & Mohamadi, M. (2018). MODFLOW/MT3DMS based modeling of leachate pollution transfer in solid waste disposal of Bahar plain deep aquifer. *Iranian Journal of Health Sciences*, 6(2), 11-30. DOI: <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i2.46> (in English)
11. Wali, S., Umar, K., & Abor, I. G. (2021). Modelling Flow And Fate Of Contaminants In Groundwater Using A Version Of The Five Steady-State Pollutant Transport Models: A Status-Review. *Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics*, 1, 1-30. DOI: <https://doi.org/10.55529/jecnam.11.1.30>
12. Zio, S., Lamien, B., Beidari, M., & Inoussa, T. (2024). Numerical simulation of pollutants transport in groundwater using deep neural networks informed by physics. *Gulf Journal of Mathematics*, 16(2), 315-323. DOI: <https://doi.org/10.56947/gjom.v16i2.1863> (in English)

Надійшла до редколегії: 29.05.2025

Прийнята до друку: 22.09.2025

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.212.5:[656.259.1-047.44:004.896]

М. І. БЕРЕЗОВИЙ^{1*}, М. П. БОЖКО^{2*}, В. В. МАЛАШКІН^{3*}, Т. В. БОЛВАНОВСЬКА^{4*},
О. О. МАЗУРЕНКО^{5*}

^{1*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 555 80 69, ел. пошта m.i.berezovyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6774-6737

^{2*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 934 40 93, ел. пошта m.pbojko@gmail.com, ORCID 0009-0002-6280-5157

^{3*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 409 61 85, ел. пошта v.v.malashkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{4*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 742 66 37, ел. пошта t.v.bolvanovska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6462-8524

^{5*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 727 58 00, ел. пошта o.o.mazurenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5591-1790

Аналіз впливу взаємного розташування уповільнювачів та обхідних колій на довжину гіркових горловин і їх автоматизоване проєктування

Мета. Метою даного дослідження є пошук способів скорочення довжини гіркових горловин сортувальних парків шляхом аналізу взаємного розташування уповільнювачів спускної частини та інших елементів колійного розвитку гірок – стрілочних переводів, їх ізольованих передстрілочних ділянок, кривих ділянок колій та суміжних, у т.ч. обхідних, колій. **Методика.** Одним з напрямків скорочення енерговитрат на розформування та формування составів на сортувальних гірках є удосконалення конструкції їх колійного розвитку, зокрема розробка та впровадження заходів для скорочення довжини гіркових горловин. Для вирішення задачі виконано комплексний аналіз технології розпуску составів на сортувальних гірках, застосовано методи наукового аналізу і синтезу конструкції колійного розвитку на базі аналітичної геометрії, методи імітаційного моделювання з метою визначення взаємного положення уповільнювачів спускної частини та суміжних обхідних колій. **Результати.** В роботі на підставі аналізу нижньої частини габариту наближення будівель С та габаритних розмірів балкових вагонних уповільнювачів з пневматичним приводом розроблено технічні рішення, що дозволяють наблизити до котловану уповільнювача колію з крайнього пучка сортувальних колій в обхід горба гірки. Розрахунок параметрів примикань обхідної колії з пучка сортувальних колій показав, що скорочення прямої ділянки колії за гальмівною позицією становить в середньому 5,65 м в залежності від типу нижнього уповільнювача, укладеного на даній гальмівній позиції. **Наукова новизна.** В роботі удосконалено методи проєктування спускної частини сортувальних гірок та обхідних колій; вперше встановлена залежність величини скорочення довжини стрілочної горловини крайнього пучка колій сортувального парку від типів уповільнювачів, якими обладнана гальмівна позиція. **Практична значимість.** Практична значимість роботи полягає у можливості використання отриманих рішень інженерами-проєктувальниками при проведень реконструктивних заходів на існуючих сортувальних гірках та при проєктуванні нових гіркових сортувальних пристроїв на магістральних залізницях та об'єктах промислового залізничного транспорту.

Ключові слова: сортувальна гірка; вагонний уповільнювач; обхідна колія; габаритна відстань; автоматизоване проєктування

Вступ

Сортувальні станції відіграють ключову роль у поїздоутворенні на залізницях. При цьому механізовані сортувальні гірки забезпечу-

ють виконання основного обсягу маневрової роботи залізничних станцій [13–15, 17] з розформування та формування поїздів. Виконання цієї маневрової роботи пов'язано не лише зі значними витратами часу, а й з високою собі-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

вартістю і необхідністю застосування відповідних маневрових засобів. Дослідження, що ставлять на меті удосконалення процесу маневрової роботи на гірках діляться на два напрямки – удосконалення технології виконання маневрових операцій та удосконалення конструкції колійного розвитку сортувальних станцій загалом і механізованих гірок зокрема.

Механізовані сортувальні гірки українських залізниць обладнані балковими вагонними уповільнювачами з пневматичним приводом для зменшення швидкості скочування відцепів в процесі розпуску составів. Їх застосування забезпечує інтервальне та прицільне гальмування відцепів.

Перші такі механічні засоби, що прийшли на заміну башмачному гальмуванню, з'явилися у 1933 році на станції Красний Лиман. Ці пристрої називали ретардери (англ. retarder – уповільнювач), вони мали пневматичний привід, а їх конструкція з певними змінами була запозичена у ретардерів, що експлуатувалися у той час на залізницях США. Принцип їх дії полягає у притисненні чотирьох гальмівних балок, розташованих вздовж рейок по дві на кожну рейку, до ободів коліс з обох боків.

Формалізація схем взаємного укладання вагонних уповільнювачів, суміжних стрілочних переводів і кривих ділянок колії була розпочата ще в роботі [8] і завершена для тогочасного технічного оснащення сортувальних гірок в роботі [2]. У подальшому ці норми практично не зазнали принципових змін.

За часів незалежності в Україні було розроблено та впроваджено три нових типи вагонних уповільнювачів у різних виконаннях за кількістю секцій – НК–114 Новокраматорського машинобудівного заводу, УВСК Старокраматорського машинобудівного заводу, ЗВУ заводу Донецькгірмаш. Також на початку 21-го сторіччя українськими залізницями було придбано та встановлено на сортувальних гірках значну кількість уповільнювачів російського виробництва типу КЗ у триланковому та п'ятиланковому виконанні.

Уповільнювачі, що експлуатуються на залізницях України, відрізняються довжиною по балках, шириною конструкції та глибиною залягання відносно рівня головки рейки. Ці пара-

метри визначають конструкцію котловану для їх розміщення.

Необхідно відзначити, що уповільнювачі, під час розпуску, так же як і розділові стрілки та граничні стовпчики останніх розділових стрілок, є розділовими елементами. Гальмування відцепів в процесі розпуску повинно забезпечувати не тільки розділення відцепів на розділових елементах, а й допустиму швидкість співударяння вагонів в глибині сортувального парку, можливість зупинки відцепів при виникненні нестандартних ситуацій.

Сортувальні гірки характеризуються багатьма технічними параметрами – кількістю сортувальних колій, їх поділом на «пучки» колій, взаємним розташуванням стрілок і уповільнювачів та їх кількістю, кількістю колій насуву та спускних колій, наявністю обхідних колій, довжиною окремих елементів, висотою гірки та її поздовжнім профілем.

В роботі [16] доведено, що забезпечення максимальних інтервалів на розділових елементах, при яких забезпечуються найкращі умови розпуску, шляхом гальмування відцепів залежить від взаємного розташування розділових елементів та довжини маршруту скочування відцепів від вершини гірки до розрахункової точки.

У зв'язку з цим, дослідження, спрямовані на удосконалення конструкції сортувальних гірок з метою покращення умов розпуску составів в умовах зростання потреби в реконструктивних заходах на сортувальних гірках, мають практичне значення для залізниць.

Мета

Метою даного дослідження є пошук способів скорочення довжини гіркових горловин сортувальних парків шляхом аналізу взаємного розташування уповільнювачів спускної частини та інших елементів колійного розвитку гірок – стрілочних переводів, їх ізольованих передстрілочних ділянок, кривих ділянок колій та суміжних, у т.ч. обхідних, колій.

Методика

Галузевими будівельними нормами [10] п. 7.13 встановлено, що «у горловинах гірок будь-якої потужності слід передбачати прямі ділянки колії для укладання вагонних уповіль-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

новачів. довжина цих ділянок визначається залежно від кількості і типу уповільнювачів на кожній гальмівній позиції». П. 7.14 [10] встановлює, що «уповільнювачі на гальмівних позиціях слід вкладати за затвердженими епюрами з урахуванням вимог до їх взаємного розташування», однак самі епюри в даному нормативному документі відсутні.

Недіючий в нинішній час документ – «Правила і норми проектування сортувальних пристроїв ВСН 207–89» [7], містить схеми взаємного розташування уповільнювачів суміжних пучкових (других) гальмівних позицій (ГП2). В діючих правилах і нормах проектування сортувальних пристроїв [10] ці схеми та інформація про їх заміну чи скасування відсутні. Тому далі в статті проведено критичний аналіз вказаних схем, що наведені саме в [7].

Основні параметри розташування уповільнювачів на ГП2 та обхідної колії наведені на рис. 1.

Наприклад для уповільнювачів КВ–3 відстань між осями колій в перерізі початку гальмівних балок становить $e_{r6} = 4\ 150$ мм; мінімальна відстань від осі суміжної колії до елементів конструкції уповільнювача – $C = 2\ 750$ мм.

При ширині конструкції уповільнювача КВ–3 $S_{KB-3} = 3\ 800$ мм мінімальна ширина технологічного зазору між елементами конструкції уповільнювачів залежить від кута між коліями. В спрощеному вигляді з достатнім ступенем точності вона може бути розрахована за виразом:

$$E = e_{r6} - 2 \times S_{KB-3} / 2 = 4150 - 3800 = 350 \text{ мм.}$$

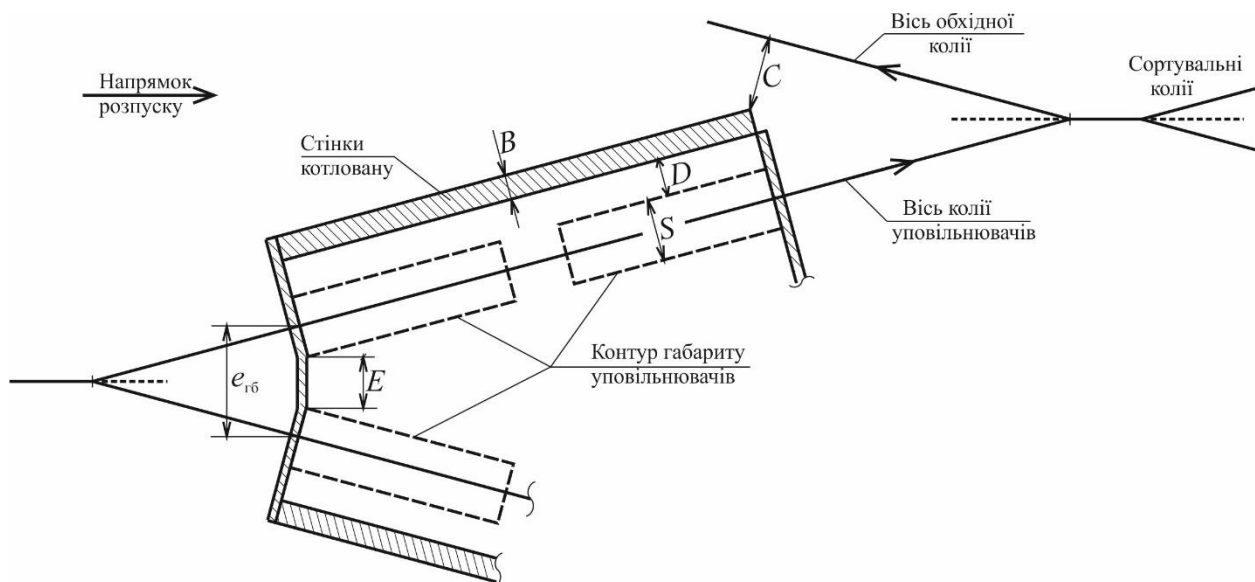


Рис. 1. Основні параметри розташування уповільнювачів на ГП2 та обхідної колії:

B – ширина стіни котловану; C – розрахункова габаритна відстань;

D – ширина проходу між уповільнювачем і стіною котловану;

S – ширина уповільнювача; E – зазор між елементами конструкції уповільнювачів; e_{r6} – відстань між осями колій в перерізі початку гальмівних балок

Fig. 2. Basic parameters for the location of retarders on GP2 and the bypass track:

B – width of the excavation wall; C – calculated overall distance;

D – width of the passage between the retarder and the wall of the excavation pit;

S – width of the retarder; E – gap between the structural elements of the retarders;

e_{gb} – distance between the axes of the tracks in the cross-section at the beginning of the brake beams

Результати розрахунку величини E для уповільнювачів інших типів на суміжних ГП2, схеми яких наведені в [7], представлені у табл. 1.

Таблиця 1
Розрахунок мінімальної ширини
технологічного зазору E

Table 1

Calculating the minimum width of the process gap E

Тип уповільнювачів	$e_{гб}$, мм	$S_{уп}$, мм	E , мм
КВ–3	4 150	3 800	350
КНП–5	4 400	3 900	500
ВЗПГ–5, ВЗПГ–3	3 800	3 250	550

Величина $e_{гб}$ впливає на довжину стрілочної горловини, але не пов'язана з примиканням обхідної колії.

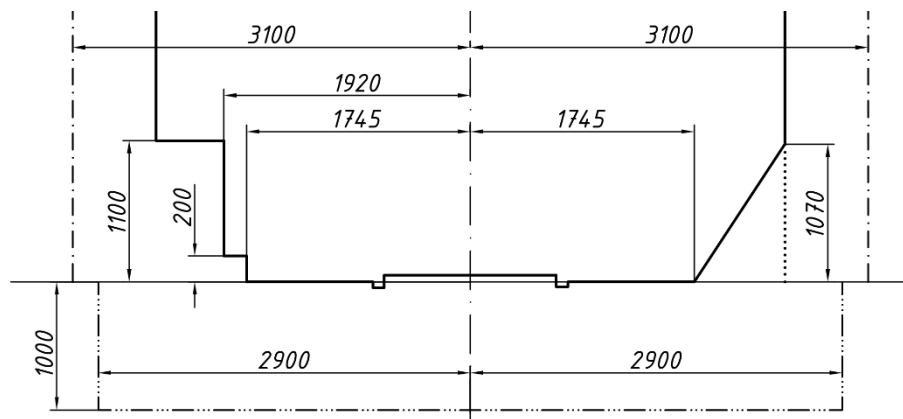
На взаємне розташування нижнього уповільнювача ГП2 та обхідної колії впливають (див. рис. 1): ширина уповільнювача S , ширина проходу між уповільнювачем і стіною котловану D , товщина стіни котловану B і відстань від осі обхідної колії до стіни котловану C .

В подальших дослідженнях та розрахунках ширина технологічного зазору між елементами конструкції уповільнювачів прийнята рівною $D = 500$ мм, що відповідає мінімальній ширині проходу.

Для визначення мінімальної відстані від осі суміжної обхідної колії до стіни котловану гальмівної позиції ГП2 проаналізуємо вимоги габариту наближення споруд C [10] з урахуванням будівельних норм [9], де вимоги до мінімальної міжколійної відстані між суміжними коліями трактуються з урахуванням здійснення на цих коліях необхідних технічних та технологічних операцій.

На рис. 2 наведено нижню частину габариту наближення будівель C , та лінію наближення фундаментів будівель і опор, підземних тросів, кабелів, трубопроводів і інших споруд, що не відносяться до колій, на перегонах і станціях, за винятком інженерних споруд і пристроїв СЦБ у місцях розташування сигнальних і трансляційних точок.

Уповільнювач разом з основою та конструктивними елементами котловану є пристроєм, який вмонтовано в залізничну колію і відноситься до залізничної колії. Із конструктивних елементів уповільнювача вище головки рейки розташовуються тільки балки із вмонтованими в них гальмівними шинами, що безпосередньо взаємодіють з ободами коліс вагонів під час їх гальмування.



----- Лінія наближення фундаментів будівель і опор

Рис. 2. Нижня частина габариту наближення будівель C Fig. 2. Lower part of the building approach dimension C

Це означає, що конструктивні елементи уповільнювача, його основи та котловану, які розташовуються нижче рівня головки рейки, можуть бути розміщені всередині контуру лінії наближення фундаментів будівель і опор не

тільки колії, на якій вмонтовано уповільнювач, а також, за необхідності, і суміжної обхідної колії. Відстань від осі колії уповільнювача визначається не тільки вимогами габариту C , а й потрібною шириною проходу D між упові-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

льнювачем і стіною. Ця відстань може бути меншою ніж передбачено габаритом C (2 900 мм). Для максимального скорочення довжини гіркової горловини вісь обхідної колії повинна розміщуватись на мінімально можливій відстані від стіни котловану ГП2. При цьому стіна котловану ГП2 виконує функції підпірної стіни для верхньої і нижньої будови обхідної колії і може знаходитись на меншій ніж 2 900 мм відстані, яка передбачена габаритом C .

Таким чином, задача пошуку методів скорочення довжини гіркової горловини належить до задач проектування елементів колійного розвитку та технічного оснащення залізничних станцій з гірковими сортувальними пристроями і експлуатації залізничного транспорту.

Для розв'язання поставленої задачі виконано комплексний аналіз технології розпуску составів на сортувальних гірках; для аналізу взаємного розташування елементів гіркових горловин сортувальних парків на підставі правил і норм проектування відповідних елементів залізничних станцій застосовано методи наукового аналізу і синтезу конструкції колійного розвитку та аналітичної геометрії; методи імітаційного моделювання використані для спрощення і прискорення процедури визначення взаємного положення технічного оснащення уповільнювачів спускної частини та суміжних обхідних колій.

Результати

Згідно з наведеною на рис. 3 схемою примикання обхідної колії з пучка сортувальних колій довжина прямої ділянки від центру стрілочного переходу (ЦСП) до початку уповільнювача $L_{\text{ПР}}$ залежить від:

- габаритної відстані між віссю обхідної колії та підпірною стіною (C);
- товщини підпірної стіни (B);
- ширини технологічного зазору між підпірною стіною та уповільнювачем (D);
- конструкційної ширини уповільнювача (S).

Складність проектування примикання обхідної колії полягає у необхідності дотримання розрахункової габаритної відстані C , яка вимірюється по лінії від кута підпірної стіни (точка А на рис. 3) перпендикулярно лінії, дотичної до осі кривої ділянки обхідної колії. Для спрощення процесу проектування і отримання проектних рішень в середовищі AutoCAD доцільно використовувати інструментарій автоматизованого проектування. Для практичного визначення положення елементів котлованів уповільнювачів, стрілочного переходу примикання обхідної колії доцільно застосовано програмний комплекс, розглянутий в роботах [5, 6], який і дає можливість формування графічної моделі в системі AutoCAD.

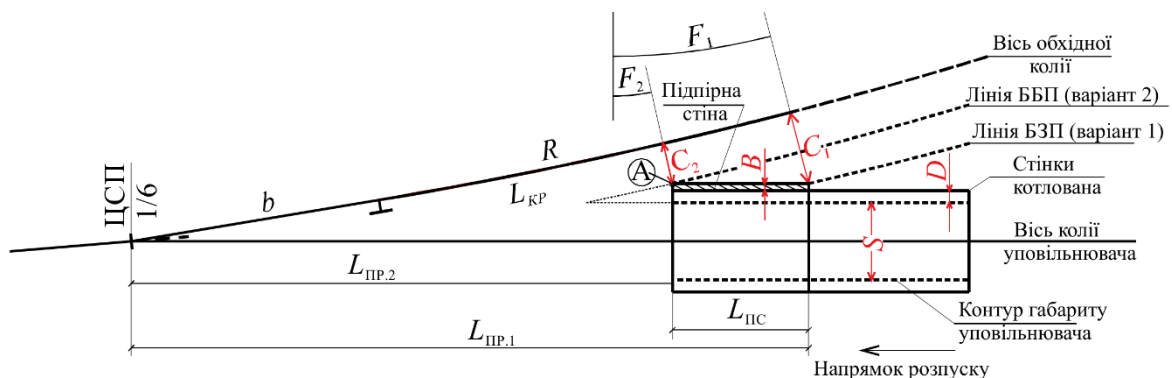


Рис. 3. Розрахункова схема примикання обхідної колії з пучка сортувальних колій

Fig. 3. Design diagram of the junction of a bypass track with a marshalling track bundle

Для оцінки габаритної відстані C на рис. 4 наведено поперечний переріз у розрахунковому

місці – точці А. Попередньо прийнято, що рівні верхи головок рейок колій (РГР) співпадають.

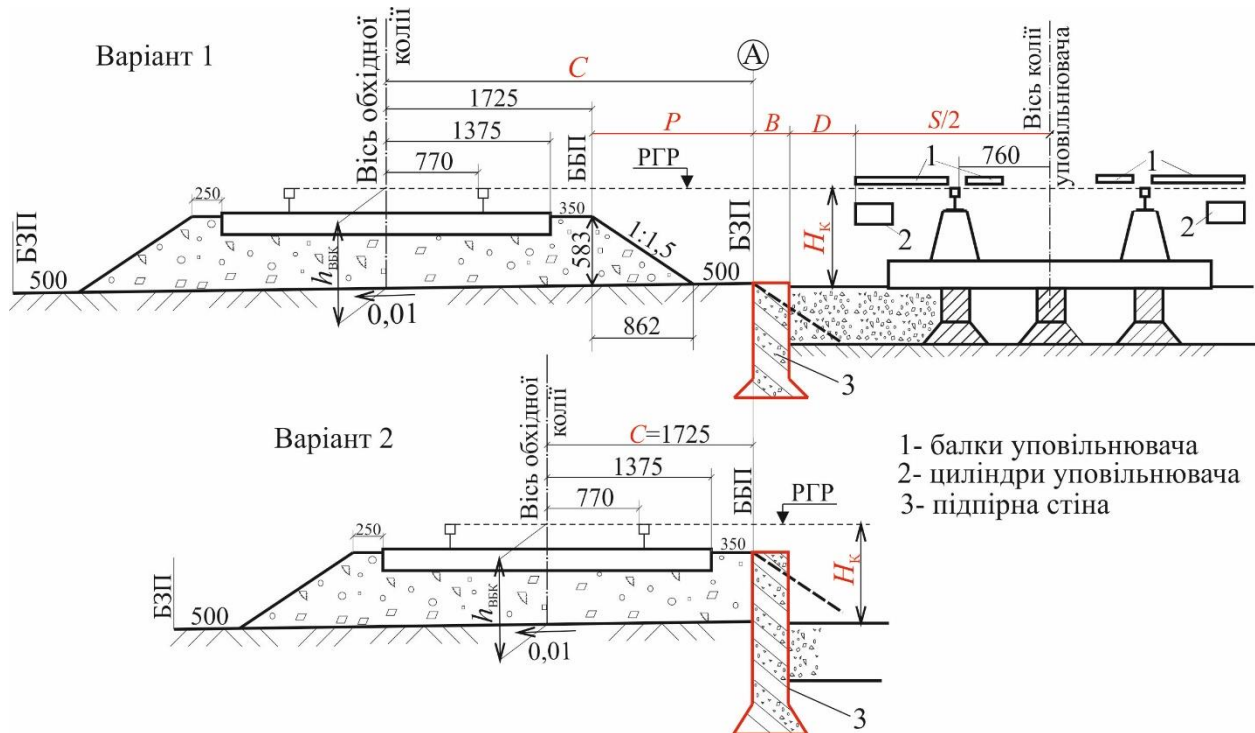


Рис. 4. Схема поперечного перетину суміжних колій

Fig. 4. Diagram of the cross section of adjacent tracks

З метою наочності розрахунків для кривої ділянки об'їздної колії радіусом $R = 200$ м прийнято згідно з [4] наступні вихідні дані:

- рейки колії типу Р65;
- шпали дерев'яні;
- плече баластної призми $0,35$ м з урахуванням його поширення із зовнішнього боку кривої.

Слід відзначити, що при відповідному обґрунтуванні радіус кривої ділянки об'їздної колії може бути зменшений згідно з вимогами [9].

За цими даними згідно з [4] встановлено:

- відстань між віссю колії та брівкою баластної призми (ББП) $1,725$ м;
- висота верхньої будови колії по осі колії $h_{\text{ВБК}} = 0,835$ м;
- земляне полотно односкіле крутизною $0,01$ від уповільнювача;
- товщина баластного шару під брівкою баластної призми (ББП) $h = 0,583$ м;
- крутизна відкосу баласту $1:1,5$;
- ширина обочини земляного полотна $0,5$ м.

За наведеними даними за нормальних умов (варіант 1 на рис. 4) розраховано:

$$P = 0,862 + 0,5 = 1,362 \text{ м};$$

$$C_1 = 1,725 + 1,362 = 3,087 \text{ м}.$$

За відсутності відкосу земляного полотна після брівки (БЗП) його функції виконує підпiрна стiна, яка сприймає бокові навантаження.

Відповідно до наведеної на рис. 3 схеми величини $L_{\text{пр}}$ визначається за виразом

$$L_{\text{пр}} = b \cos \alpha + R \sin F - R \sin \alpha + C \sin F, \quad (1)$$

а величина кута F визначається з рівняння:

$$b \sin \alpha + R \cos \alpha - R \cos F - C \cos F = \\ = B + D + S/2. \quad (2)$$

Далі наведено розрахунок параметрів укладання уповільнювача ВЗПГ–5 та стрілочного переходу примикання об'їздної колії марки 1/6 з рейок Р65 за наступними даними: $S = 3,25$ м; $B = 0,3$ м; $D = 0,5$ м.

З рівнянь відповідно (2) та (1):

$$F_1 = \arccos\left(\frac{b \sin \alpha + R \cos \alpha - (B + D + S/2)}{R + C_1}\right) =$$

$$= \arccos\left(\frac{10,563 \sin \alpha + 200 \cos \alpha - (0,3 + 0,5 + 3,25/2)}{200 + 3,087}\right) = 14^\circ 31' 53,2''$$

$$L_{\text{пр}} = 10,563 \cos \alpha + 200 \sin F_1 - 200 \sin \alpha + 3,087 \sin F_1 = 28,496 \text{ м}$$

З метою скорочення відстані $L_{\text{пр}}$ можливо зменшити габаритну відстань C , якщо наблизити ББП обхідної колії до підпірної стіни, тобто на відстань $C_2 = 1,725$ м (див. варіант 2 на рис. 4). При цьому підпірна стіна стає вищою

і витримує бокове навантаження не тільки від земляного полотна а й від баластного шару. Порівняно з попередніми розрахунками змінюється тільки величина C , а розрахункові параметри становлять:

$$F_2 = \arccos\left(\frac{10,563 \sin \alpha + 200 \cos \alpha - (0,3 + 0,5 + 3,25/2)}{200 + 1,725}\right) = 12^\circ 57' 18,5''$$

$$L_{\text{пр}2} = 10,563 \cos \alpha + 200 \sin F_2 - 200 \sin \alpha + 1,725 \sin F_2 = 22,763 \text{ м}$$

Скорочення довжини прямої ділянки становить:

$$L_{\text{ПС}} = 28,496 - 22,763 = 5,733 \text{ м,}$$

що дорівнює довжині підпірної стіни (див. рис. 4).

Отже, скорочення довжини стрілочної горловини крайнього пучка колій сортувального парку на $L_{\text{ПС}} = 5,7$ м досягається будівництвом підпірної стіни. Економічне обґрунтування да-

ного технічного рішення в даній статті не розглядається, а вказана відстань може бути додатково зменшена шляхом влаштування радіусу кривої ділянки обхідної колії меншого ніж 200 м.

Оскільки довжина підпірної стінки залежить від габаритної ширини уповільнювача, в табл. 2 наведені результати розрахунків для різних типів уповільнювачів.

Таблиця 2

Розрахункові параметри примикання обхідної колії з пучка сортувальних колій

Table 2

Design parameters for the junction of a bypass track with a marshalling track bundle

Тип уповільнювача	S, м	B+D+S/2, м	L _{пр} , м при C=		L _{ПС} , м
			3,087 м (варіант 1)	1,725 м (варіант 2)	
ВЗПГ–3, 5	3,25	2,425	28,496	22,763	5,733
ВЗП–3, 5	3,30	2,450	28,592	22,872	5,720
НК–114, УВСК, ЗВУ	3,60	2,600	29,166	23,517	5,649
КЗ–3, 5	3,68	2,640	29,318	23,688	5,630
КВ–3	3,80	2,700	29,545	23,942	5,603
КНП–5	3,90	2,750	29,733	24,153	5,580

При влаштуванні обхідної колії за варіантом 2 (див. рис. 4) в розрахунковому перерізі та на певній розрахунковій відстані від перерізу унеможливується проходження щебенеочисних машин. Така ситуація виникає через

те, що мінімальна ширина вирізання баласту становить $B_{\text{min}} = 3\,800$ мм [11, 12], тобто відстань від осі колії до краю зони опускання вигрібного пристрою $b_{\text{вп}} = 1\,900$ мм перевищує

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

відстань від осі обхідної колії до підпірної стіни у варіанті 2 (див. рис. 4) – $C = 1\,725$ мм.

Такі місця мають бути відповідним чином помічені на схемах станцій і, при виникненні необхідності очищення чи заміни баластного шару на них, повинна використовуватись інша колійна техніка.

Для оцінки можливої різниці рівнів РГР суміжних колій на рис. 5 наведено схему розташування колій у поздовжньому профілі з можливими ухилами елементів. Аналіз рис. 5 показує, що обхідна колія може бути нижче колії уповільнювача на $64..106$ мм і це не впливає на мінімальну відстань між коліями у плані.

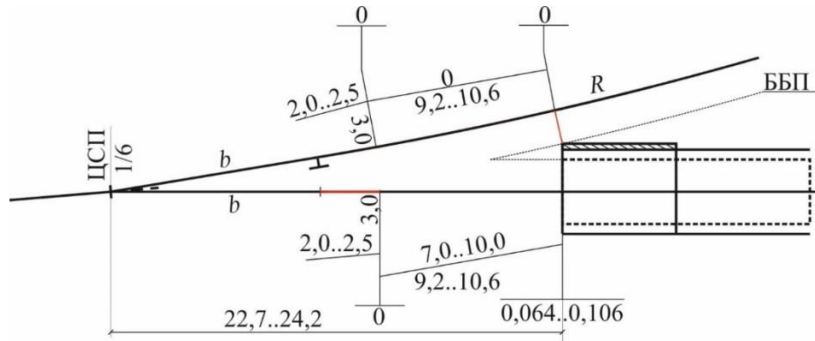


Рис. 5. Розташування суміжних колій у поздовжньому профілі

Fig. 5. Location of adjacent tracks in the longitudinal profile

Зі схеми на рис. 5 видно, що зміна рівня головки рейки обхідної колії відносно рівня спускної колії на початку уповільнювача не впливає на відстань між ними, а впливає тільки на загальну висоту підпірної стіни.

Наукова новизна та практична значимість

В роботі удосконалено методи проектування спускної частини сортувальних гірок та обхідних колій; вперше встановлена залежність величини скорочення довжини стрілочної горловини крайнього пучка колій сортувального парку від типів уповільнювачів, якими обладнана гальмівна позиція.

Практична значимість роботи полягає у можливості використання отриманих рішень інженерами-проектувальниками при проведенні реконструктивних заходів на існуючих сортувальних гірках та при проектуванні нових гіркових сортувальних пристроїв на магістральних залізницях та об'єктах промислового залізничного транспорту.

Висновки

Дослідження, виконані в роботі, дозволяють зробити наступні висновки.

1. В діючій нормативній документації, що регламентує норми проектування гіркових сорту-

вальних пристроїв, відсутні затверджені епюри укладання уповільнювачів. В роботі на підставі аналізу габаритних розмірів балкових вагонних уповільнювачів з пневматичним приводом, які експлуатуються на українських залізницях, розроблені технічні рішення взаємного укладання уповільнювачів та суміжних обхідних колій.

2. Розроблені за наведеною методикою технічні рішення дозволяють наблизити до котловану уповільнювача колію з крайнього пучка сортувальних колій в обхід горба гірки. Розрахунок параметрів примикань обхідної колії з пучка сортувальних колій показав, що скорочення прямої ділянки колії за гальмівною позицією в бік сортувальних колій становить в середньому $5,65$ м в залежності від типу нижнього уповільнювача, укладеного на даній гальмівній позиції. Наведене значення може бути збільшене шляхом укладання кривої ділянки на обхідній колії радіусом менше 200 м за відповідним обґрунтуванням.

3. Аналіз поздовжнього профілю колій гальмівної позиції та обхідної колії показав, що зміна рівня головки рейки обхідної колії відносно рівня спускної колії на початку уповільнювача не впливає на відстань між ними, а впливає тільки на загальну висоту підпірної стіни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Березовий М. І., Божко М. П., Малашкін В. В., Болвановська Т. В., Мазуренко О. О. Аналіз конструкції обхідних колій в сортувальних парках та їх автоматизоване проектування. *Транспортні системи та технології перевезення*. 2025. № 29. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325346>
2. Бузанов С. П., Карпов А. М., Рыцарев М. А. *Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств*. Москва : Транспорт, 1965. 232 с.
3. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. *Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм. На заміну ГОСТ 9238-83*; чинний від 2012-12-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2012. 50 с.
4. *Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0269 / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп.* Київ : Трансп. України, 2012. 456 с.
5. Козаченко Д. М., Божко М. П., Березовий М. І., Малашкін В. В. Автоматизація розрахунку положення граничного стовпчика між суміжними коліями різної конструкції. *Транспортні системи і технології перевезень*. 2023. № 25. С. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2023/284497>
6. Козаченко Д. М., Божко М. П., Березовий М. І., Малашкін В. В. Аналіз існуючих методів розрахунку положення граничних стовпчиків. *Транспортні системи і технології перевезень*. 2022. № 24. С. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2022/272303>
7. *Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР : ВСН 207-89 / МПС СССР*. Москва : Транспорт, 1992. 104 с.
8. Рогинский Н. О., Родимов Б. А., Зубрилин Г. И. *Механизация сортировочных горок*. Москва : Трансжелдориздат, 1949. 248 с.
9. *Споруди транспорту. Залізниця колії 1520 мм. Норми проектування : ДБН В.2.3-19:2018 / Укр. держ. ун-т залізн. трансп.* Київ : Мінрегіон України, 2018. 126 с.
10. *Споруди транспорту. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування : ГБН В.2.3-37472062-1:2012 / Держ. підприємство Н.-д. та проект.-вишукув. ін-т транспорт. буд-ва «Київдіпротранс»*. Київ : М-во інфраструктури України, 2012. 112 с.
11. Сушков В. Ф., Шраменко В. П., Белорусов О. І., Возненко А. Д. *Технологія ремонту й утримання колії*. Харків : Укр. держ. акад. залізн. трансп., 2010. 327 с.
12. Уманов М. І., Гнатенко В. П., Мойсеєнко К. В., Пагласов О. М., Бабенко В. К., Черник В. І. *Збірник типових технологічних процесів капітального та середнього ремонтів залізничної колії : ЦП-2-1198*. Дніпропетровськ : ДІТ, Арт-Прес, 2000. 108 с.
13. Fischer S. Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2022. № 19 (3). P. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.8>
14. Fischer S. Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry – A case study. *Geotextiles and Geomembranes*. 2022. № 50 (5). P.1036–1051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.005>
15. Kou L., Sysyn M., Fischer S., Liu J., Nabochenko O. Optical Rail Surface Crack Detection Method Based on Semantic Segmentation Replacement for Magnetic Particle Inspection. *Sensors*. 2022. № 22 (21), 8214. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218214>
16. Kozachenko D., Bobrovskiy V., Demchenko Y. A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*. 2018. Vol. 26, no. 3. P. 189–199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0161-2>
17. Szalai S., Szívós B.F., Kurhan D., Németh A., Sysyn M., Fischer S. Optimization of Surface Preparation and Painting Processes for Railway and Automotive Steel Sheets. *Infrastructures*. 2023. № 8 (2), P. 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020028>

M. I. BEREZOVIY^{1*}, M. P. BOZHKO^{2*}, V. V. MALASHKIN^{3*}, T. V. BOLVANOVSKA^{4*},
O. O. MAZURENKO^{5*}

^{1*}Dep. «Transport Hubs», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 555 80 69, e-mail m.i.berezovyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6774-6737

^{2*}Dep. «Transport Hubs», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 934 40 93, e-mail npbojko@gmail.com, ORCID 0009-0002-6280-5157

^{3*}Dep. «Transport Hubs», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 409 61 85, e-mail v.v.malashkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{4*}Dep. «Transport Hubs», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 742 66 37, e-mail t.v.bolvanovska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6462-8524

^{5*}Dep. «Transport Hubs», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 727 58 00, e-mail o.o.mazurenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5591-1790

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

Purpose. The purpose of this study is to find ways to reduce the length of sorting yard humps by analyzing the relative positioning of the decelerators on the descent section and other elements of the track layout of the humps, such as turnouts, their isolated pre-switch sections, curved track sections and adjacent tracks, including bypass tracks. **Methodology.** One of the approaches to reducing energy consumption during the breaking up and formation of trains on classification humps is the improvement of their track layout design, in particular the development and implementation of measures to reduce the length of hump throats. To solve the problem, a comprehensive analysis of the technology of dissolving trains on sorting humps was used, methods of scientific analysis and synthesis of track development design based on analytical geometry were applied, as well as simulation modelling methods to determine the mutual position of the decelerators of the descent section and adjacent bypass tracks. **Findings.** Based on an analysis of the lower clearance limits for structures (profile «C») and the dimensional characteristics of beam-type pneumatic wagon retarders, technical solutions were developed to allow a track from the outer group of classification tracks to approach the retarder pit area bypassing the hump body. The calculation of the parameters for connecting a bypass track from the group of classification tracks showed that the straight section of track behind the braking position can be reduced on average by 5.65 meters, depending on the type of lower retarder installed at the given braking point. **Originality.** The work improves the methods for designing the descent section of sorting humps and bypass tracks; for the first time, it establishes the dependence of the reduction in the length of the switch throat of the end track bundle of the sorting yard on the types of retarders with which the braking position is equipped. **Practical value.** The practical value of the study lies in the potential application of the obtained solutions by design engineers during reconstruction works on existing classification humps and in the design of new hump classification facilities on mainline railways and industrial railway systems.

Keywords: sorting hump; wagon decelerator; bypass track; gauge distance; automated design

REFERENCES

1. Berezoviy, M., Bozhko, M., Malashkin, V., Bolvanovska, T., & Mazurenko, O. (2025). Analysis of the Construction of Bypass Tracks in Sorting Parks and Their Automated Design. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 29, 5–13. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325346> (in Ukrainian)
2. Buzanov, S. P., Karpov, A. M., & Ryitsarev, M. A. (1965). *Proektirovanie mehanizirovannykh i avtomatizirovannykh sortirovochnykh ustroystv*. Moskva: Transport. (in Russian)
3. *Habaryty nablyzhennia budivel i rukhomoho skladu zaliznyts kolii 1520 (1524) mm, 50 DSTU B V.2.3-29:2011* (2012). (in Ukrainian)
4. Dnipropetrovskyyi natsionalnyi universytet zaliznochnoho transportu (2012). *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy: TsP-0269*. Kyiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
5. Kozachenko, D. M., Bozhko, M. P., Berezovij, M. I. & Malashkin, V. V. (2023). Avtomatyzacija rozrakhunku polozhennja ghranychnogho stovpchyka mizh sumizhnymy kolijamy riznoji konstrukciji. *Transportni systemy i tekhnologhiji perevezennj*, 25, 84-91. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2023/284497> (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

6. Kozachenko, D. M., Bozhko, M. P., Berezovyy, M. I. & Malashkin, V. V. (2022). Analiz isnujuchykh metodiv rozrakhunku polozhennja ghranychnykh stovpchykiv. *Transportni systemy i tekhnologhiji perevezenj*, 24, 75-80. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsst2022/272303> (in Ukrainian)
7. Ministerstvo putey soobscheniya SSSR. (1992). *Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznyih dorogah Soyuzn SSR: VSN 207-89*. Moskva: Transport. (in Russian)
8. Roghynskij, N. O., Rodymov, B. A., & Zubrylyn, Gh. Y. (1949). *Mekhanyzacyja sortirovochnykh ghorok*. Moskva: Transzheldoryzdat. (in Russian)
9. Ukrainnyi derzhavnyi universytet zaliznychnoho transportu. (2018). *Sporudy transportu. Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia: DBN V.2.3-19:2018*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
10. Derzhavne pidpriemstvo Naukovo-doslidnyi ta proektno-vyshukuvalnyi instytut transportnoho budivnytstva «Kyivdiprotrans». (2012). *Sporudy transportu. Sortovalni prystroi zaliznyts. Normy proektuvannia: HBN V.2.3-37472062-1:2012*. Kyiv: Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. (in Ukrainian)
11. Sushkov, V. F., Shramenko, V. P., Bjelorusov, O. I. & Voznenko, A. D. (2010). *Tekhnologhija remontu j utrymannja koliji*. Kharkiv: UkrSART. (in Ukrainian)
12. Umanov, M. I., Hnatenko, V. P., Moiseienko, K. V., Patlasov, O. M. & Babenko, V. K. (2000). *Zbirnyk ty-povykh tekhnologhichnykh procesiv kapitaljnogho ta serednjogho remontiv zaliznychnoji koliji: TsP-2-1198*. Dnipropetrovsjk: DIIT, Art-Pres. (in Ukrainian)
13. Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.8> (in English)
14. Fischer, S. (2022). Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry – A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5), 1036-1051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.005> (in English)
15. Kou, L., Sysyn, M., Fischer, S., Liu, J., & Nabochenko, O. (2022). Optical Rail Surface Crack Detection Method Based on Semantic Segmentation Replacement for Magnetic Particle Inspection. *Sensors*, 22(21), 8214. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218214> (in English)
16. Kozachenko, D., Bobrovskiy, V., & Demchenko, Y. (2018). A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*, 26, no. 3. 189-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0161-2> (in English)
17. Szalai, S., Szívós, B. F., Kurhan, D., Németh, A., Sysyn, M., & Fischer, S. (2023). Optimization of Surface Preparation and Painting Processes for Railway and Automotive Steel Sheets. *Infrastructures*, 8(2), 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020028> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.05.2025

Прийнята до друку: 19.09.2025

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.75:656.073

Є. А. ВЕЛЕГУРА^{1*}, В. М. ГОРЯЧКІН^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 051 06 35, ел. пошта velehura@gmail.com, ORCID 0009-0008-2656-8274

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 972 52 55, ел. пошта v.m.horiachkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8952-952X

Застосування смарт-контрактів при формалізації ролей у системах вантажних перевезень

Мета. Метою дослідження є розробка детальної рольової моделі для впровадження смарт-контрактів у логістичні процеси вантажних перевезень, що дозволить автоматизувати взаємодію між учасниками та підвищити прозорість операцій. **Методика.** Для досягнення поставленої мети застосовано системний підхід із використанням контекстно-рольового аналізу. Дослідження передбачає детальну декомпозицію етапів логістичного ланцюга при застосуванні смарт-контрактів, ідентифікацію ключових учасників, а також визначення їх функцій, прав та обов'язків. Цей підхід дозволяє чітко розмежувати зони відповідальності, зменшити ризики конфліктів та забезпечити прозорість дій кожного учасника. Розроблена UML-діаграма демонструє послідовність взаємодій між суб'єктами, а інтеграція смарт-контрактів забезпечує автоматизацію та незмінність операцій. **Результати.** Проведено комплексний аналіз логістичних процесів із застосуванням смарт-контрактів, що дозволило визначити права та обов'язки для семи базових ролей учасників логістичних операцій. Такий підхід забезпечує цілісне бачення системи та дозволяє описати логіку взаємодій між суб'єктами. Розроблена модель демонструє автоматизацію укладання та виконання контрактів, що сприяє зниженню часу обробки документів, оптимізації операцій та забезпеченню високого рівня безпеки даних у розподіленому реєстрі. **Наукова новизна.** Запропоновано підхід, що дозволяє інтегрувати формалізовані ролі учасників вантажних перевезень з технологією смарт-контрактів. Детальна структуризація функціональних обов'язків кожної ролі дозволяє реалізувати програмну логіку децентралізованої системи, що значно розширює можливості автоматизованого управління логістичними процесами. Підхід є універсальним і може адаптуватися до різних типів логістичних сценаріїв. **Практична значимість.** Розроблена рольова модель створює сприятливі умови для впровадження блокчейн-рішень у сфері вантажних перевезень, що дозволяє цифровізувати логістичні процеси, підвищити довіру між учасниками ланцюга постачання та знизити операційні витрати. Отримані результати мають практичне застосування для логістичних операторів, розробників програмного забезпечення та консалтингових компаній, які прагнуть модернізувати існуючі системи управління перевезеннями. Модель також може бути корисною для освітніх цілей у сфері логістики, інформатики та управління.

Ключові слова: інформаційна система; смарт-контракт; блокчейн; рольова модель; вантажні перевезення; логістика; моделювання процесів

Вступ

Зі зростанням глобальних обсягів торгівлі та розвитку інформаційних технологій вантажні перевезення перестали бути виключно «фізичним» процесом транспортування товарів від бази постачання до пункту призначення. Сучасні логістичні операції являють собою складні системи, де беруть участь численні стейкхолдери, виконуючи низку завдань: від оформлення документів і страхування до моніторингу транзиту та регулювання взаєморозрахунків. Усе це вимагає прозорості процесів, підвищення надійності зберігання даних і мінімізації ризиків шахрайства.

Із впровадженням технології блокчейн можуть бути запропоновані нові підходи до вирішення цих завдань, забезпечуючи децентралізоване та захищене середовище для зберігання й обміну інформацією про відправлення. Ключова перевага впровадження блокчейну – можливість використання смарт-контрактів, які можуть автоматично виконувати закладену логіку за певних умов без посередників.

Смарт-контракти – це самовиконувана програма, яка утворює інформаційну систему, що містить дані про вантаж і проходження ним послідовних етапів процесу перевезення, а також автоматизує дії, необхідні для здійснення транзакції в блокчейні. Після виконання транзакції такі дії стають відстежуваними та незворотними. Вони дозволяють створювати децентралізовані, прозорі та незмінні угоди, де логіка виконання прописана безпосередньо в програмному коді. Завдяки використанню криптографічних методів забезпечується високий рівень безпеки даних та автоматичне документування всіх транзакцій. Смарт-контракти мінімізують участь посередників, що знижує витрати часу та зменшує ризики людської помилки чи шахрайства [3].

Крім того, використання блокчейн-технологій відкриває можливість інтеграції з IoT-пристроями, що значно розширює функціональність логістичних систем. Смарт-контракти можуть автоматично реагувати на сигнали з датчиків, встановлених у транспортних засобах або контейнерах, забезпечуючи безперервний обмін даними про стан вантажу, його місцезнаходження та умови зберігання.

IoT-платформи можуть безпечно взаємодіяти з блокчейном: сенсори передають дані (вологість, положення, умови зберігання) прямо до смарт-контрактів. В дослідженнях [2, 5] показано, що такий підхід дозволяє автоматично відстежувати вантажі та виконувати дії (сповіщення, оплати) при фіксації подій. У результаті підвищується прозорість процесів перевезень і зменшується потреба в ручному втручанні, що є особливо важливим для контролю за чутливими або цінними вантажами. Завдяки здатності автоматично реалізовувати бізнес-правила та умови договорів, смарт-контракти здатні суттєво скорочувати затримки в обробці операцій. Як зазначено в дослідженні [9], їх застосування сприяє зменшенню затримок у ланцюгах постачання шляхом автоматизації взаємодії між сторонами.

Для моделювання та оптимізації транспортних систем використовують різні методи. У дослідженні [1] запропоновано застосування абстрактного моделювання операційних процесів для удосконалення управління рухом поїздів. Таке моделювання дозволяє диспетчерському апарату оперативно реагувати на зміну умов руху і прогнозувати ключові показники, зокрема ймовірність можливого зіткнення поїздів. На відміну від традиційних методів, використання абстрактного моделювання дає змогу створювати високошвидкісні інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень із можливістю самоадаптації до нових умов. Поєднання таких моделей зі смарт-контрактами та блокчейном відкриває перспективи автоматизованих алгоритмів координації руху та зниження людського фактора у критичних рішеннях.

Багато дослідників [7, 10, 11] відзначають, що смарт-контракти здатні спростити юридичний і технічний аспекти угод, зменшити витрати часу на ручну обробку документів і сприяти підвищенню безпеки логістичних ланцюгів.

Водночас одна з центральних проблем полягає у визначенні ролей користувачів, що беруть участь у таких смарт-контрактах. Адже кожен стейкхолдер – від вантажовідправника до митниці чи страхової компанії — має власні функції та права, які слід формально окреслити та зафіксувати в розподіленому реєстрі. Недостатньо лише впровадити блокчейн-технології; потрібно розробити чітку модель взаємодії між

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

усіма учасниками з урахуванням їхніх обов'язків, рівня доступу до інформації, а також прав на ініціювання чи підтвердження певних операцій.

У попередніх дослідженнях [4, 8] було запропоновано загальні підходи до впровадження блокчейну у сфері логістики, проте вони не завжди торкалися глибокої деталізації ролей користувачів. Ті ж роботи, які акцентують увагу на ролях (наприклад, [6]), нерідко пропонують високорівневі концепції без розгляду нюансів саме вантажоперевезень.

Таким чином, існує потреба у формалізації та структуруванні ролей учасників вантажних перевезень у середовищі, що базується на смарт-контрактах. Відсутність такої чіткої формалізації ускладнює як проектування системи, так і забезпечення безпеки доступу й виконання операцій. Тому створення комплексної моделі, де кожна роль користувача буде визначена з урахуванням реальних бізнес-процесів, що супроводжують перевезення вантажів, є актуальною задачею.

Мета

Метою даної роботи є створення удосконаленої ролівої моделі учасників логістичного ланцюга для процесів вантажних перевезень з інтеграцією до неї концепції смарт-контрактів на основі технології блокчейн.

Основними завданнями є:

1) ідентифікувати ключові ролі користувачів та визначити перелік їхніх прав і обов'язків у рамках логістичних процесів з використанням смарт-контрактів;

2) обґрунтувати функції виконавців кожної ролі, проаналізувати взаємодію між ними та правила передачі інформації при застосуванні технології блокчейн;

3) розробити структуру інформаційної системи, яка може бути реалізована у системі смарт-контрактів, забезпечуючи чіткий розподіл функцій;

4) забезпечити умови для масштабованості та гнучкості такої системи при зміні вимог чи додаванні нових ролей.

Досягнення поставленої мети сприятиме інтеграції блокчейн-рішень у сферу вантажних перевезень, підвищить прозорість логістичних процесів та зменшить імовірність конфліктів і шахрайства в процесі доставки вантажів.

Методика

Методика дослідження ґрунтується на застосуванні системного підходу для формалізації ролей користувачів у процесі вантажних перевезень і визначенні їх функціональних обов'язків при застосуванні технології смарт-контрактів. Даний підхід передбачає поетапний аналіз логістичного ланцюга, що включає збір загальних вимог до процесу перевезення вантажів та ідентифікацію основних суб'єктів логістичної системи.

Методологія передбачає застосування контекстно-рольового аналізу, що дозволяє розглядати кожного суб'єкта не лише з позиції його формального найменування, але й у контексті виконання завдань на різних етапах перевезення, зокрема під час укладення договору, передачі вантажу, оформлення страхування та проходження митного контролю. Такий підхід забезпечує чітке розмежування рівнів доступу до інформації, що міститься у смарт-контрактах, та прийняття рішень, що сприяє мінімізації конфліктних ситуацій і запобігає дублюванню функцій між суб'єктами.

Відтворюваність дослідження забезпечується за рахунок детального опису логістичної схеми перевезення, що охоплює всі етапи – від формування замовлення до отримання вантажу кінцевим споживачем. Кожен етап процесу декомпонується на конкретні дії. Отримана структура ролей порівнюється з типовими бізнес-процесами перевезень, законодавчими вимогами та практиками великих логістичних операторів, що дозволяє виявити та усунути розбіжності шляхом коригування прав доступу та функціональних обов'язків суб'єктів.

Таким чином, обрана методика дослідження забезпечує комплексний аналіз ролей користувачів у вантажних перевезеннях, що сприяє підвищенню точності моделювання логістичних процесів та гарантує відтворюваність отриманих результатів.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

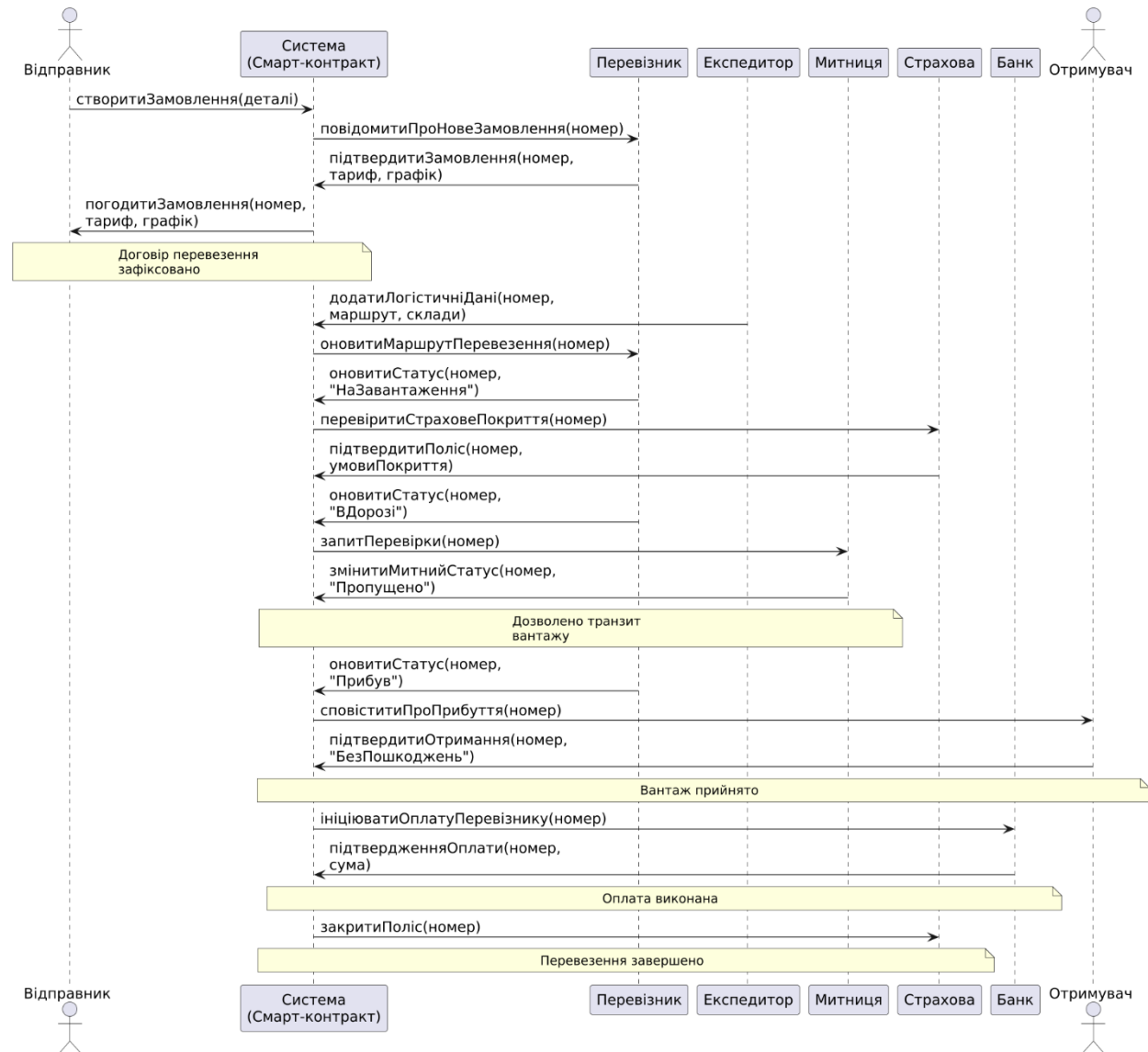


Рис. 1. UML-діаграма взаємодії учасників смарт контракту

Результати

В результаті системного аналізу було виділено сім базових ролей, які беруть участь у процесі вантажних перевезень із інтеграцією технології смарт-контрактів. Смарт-контракти, як автоматизовані програми, що виконуються на базі блокчейну, забезпечують прозорість, безпеку та автоматизацію операцій за умовами контракту.

На рис. 1 показано UML-діаграму, на якій представлено послідовність взаємодій між основними суб'єктами логістичного ланцюга, які

беруть участь у процесі вантажних перевезень із застосуванням смарт-контрактів:

- відправник ініціює створення замовлення, передаючи деталі перевезення до системи, що реалізована за допомогою смарт-контракту;
- система автоматично фіксує отримані дані та повідомляє Перевізника про нове замовлення, після чого відбувається підтвердження замовлення із зазначенням тарифу та графіку;
- експедитор доповнює інформацію, додаючи логістичні дані (маршрут, інформацію про склади), що дозволяє Перевізнику оновити маршрут перевезення;

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

– подальші етапи включають оновлення статусів перевезення Перевізником (наприклад, «На завантаження», «ВДорожі», «Прибув»), а також взаємодію з Митницею, Страховою компанією та Банком для здійснення перевірок, підтвердження транзакцій і фінансових операцій;

– отримувач підтверджує факт отримання вантажу, що стає умовою для фінального закриття угоди, включаючи автоматичну ініціацію оплати та завершення страхового покриття.

Розглянемо детальніше кожен з ролей з акцентом на механізми використання смарт-контрактів.

1. Вантажовідправник (Shipper)

Функціональні обов'язки:

– Ініціювання контракту: Вантажовідправник створює початковий запит на перевезення, де смарт-контракт автоматично фіксує основні параметри вантажу, умови доставки, тарифи та строки. Дані, що вводяться, зберігаються у блокуванні з використанням криптографічних алгоритмів, що гарантує їх незмінність.

– Укладення угоди: За допомогою смарт-контракту відправник може пропонувати та погоджувати умови перевезення з перевізником. Смарт-контракт автоматично фіксує узгоджені комерційні умови, забезпечуючи їх прозорість та відсутність можливості їх односторонньої зміни.

– Надання супровідних документів: Документи (наприклад, інвойси, сертифікати походження) завантажуються в систему через смарт-контракт із застосуванням цифрового підпису. Це забезпечує достовірність даних та їх доступність для всіх учасників процесу.

Вантажовідправник має можливість вносити та редагувати інформацію до моменту підтвердження замовлення перевізником. Будь-які зміни реєструються смарт-контрактом із зазначенням часу та електронного підпису вантажовідправника.

2. Перевізник (Carrier)

Функціональні обов'язки:

– Підтвердження прийняття вантажу: Перевізник реєструє факт прийняття вантажу через смарт-контракт, що забезпечує негайне оновлення статусу угоди в реальному часі.

– Оновлення статусу перевезення: За допомогою смарт-контрактів здійснюється автома-

тичне відстеження різних етапів перевезення (завантаження, переміщення, доставка). Кожна зміна статусу фіксується в смарт контракті, що забезпечує прозорість та недопустимість несанкціонованих змін.

– Оцінка вартості перевезення: Смарт-контракт автоматично порівнює введені дані з попередньо узгодженими умовами, що дозволяє перевізнику ініціювати процес погодження тарифів та комерційних умов.

Перевізник має право редагувати статус перевезення та підтверджувати (або відхилити) ініційовані іншими сторонами зміни. Це можуть бути коригування вартості, зміни маршрутів, строків доставки, характеристик вантажу або умов оплати. Смарт-контракт автоматично фіксує всі внесені зміни, забезпечуючи їхню незмінність і контрольованість.

3. Експедитор (Freight Forwarder)

Функціональні обов'язки:

– Оптимізація логістики: Використовуючи дані, що зберігаються у смарт-контракті, експедитор може аналізувати та визначати оптимальні маршрути перевезення з урахуванням актуальної інформації про транспортні засоби, погодні умови та завантаження.

– Документальний супровід: Смарт-контракт забезпечує автоматичну перевірку митних і транспортних документів, що завантажуються експедитором, із використанням криптографічних підписів для підтвердження їх достовірності.

– Координація перевантажень: За допомогою інтегрованих систем управління логістикою, смарт-контракт синхронізує розклад перевезень, контактні дані складів і портів, фіксуючи кожен зміну в системі.

Експедитор вносить зміни, що стосуються логістичних параметрів (маршрут, графік, дані складів), проте базові умови (вартість, кінцевий термін) змінюються лише за попередньої згоди вантажовідправника та перевізника. Кожна зміна документується в смарт-контракті з можливістю аудиту.

4. Митний орган (Customs)

Функціональні обов'язки:

– Перевірка даних про вантаж: Митний орган здійснює автоматизовану перевірку декларацій та опису товару, завантажених у смарт-контракт. За допомогою алгоритмів верифікації

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

даних здійснюється швидко і точна перевірка відповідності.

– Застосування митних ставок: Смарт-контракт містить вбудовані розрахункові функції, які дозволяють автоматично визначати митні платежі на основі введених даних та актуальних тарифів.

– Фіксація результатів контролю: Після проведення перевірки, смарт-контракт автоматично оновлює статус вантажу щодо проходження митного контролю – відзначаючи, чи було надано дозвіл на випуск вантажу.

Митний орган має право читати та записувати дані у розділ «митний статус» смарт-контракту, причому будь-які зміни оновлюються автоматично із зазначенням результатів перевірки.

5. Страхова компанія (Insurer)

Функціональні обов'язки:

– Оцінка ризиків та формування страхових полісів: На основі даних, що зберігаються в смарт-контракті, страхова компанія проводить аналіз ризиків, автоматично розраховуючи страхову премію та умови покриття.

– Реєстрація страхових договорів: Усі дані про укладені страхові договори (страхова премія, сума покриття) завантажуються в смарт-контракт із застосуванням цифрових підписів, що забезпечує їх прозорість та недоторканість.

– Виплата відшкодування: У разі настання страхового випадку, смарт-контракт, за заздалегідь визначеними умовами, автоматично ініціює процес виплати відшкодування. Процедура здійснюється безпосередньо після підтвердження обставин страхового випадку, що реєструється в системі.

Страхова компанія може створювати, редагувати та контролювати страхові поліси. Проте вона не має доступу до зміни логістичних та митних даних, які зберігаються в інших секціях смарт-контракту.

6. Банк/фінансова установа (Bank)

Функціональні обов'язки:

– Верифікація платіжних зобов'язань: Банк здійснює автоматизовану перевірку відповідності платіжних операцій умовам контракту. Смарт-контракт верифікує платіжні дані із заздалегідь встановленими умовами, гарантуючи правильність розрахунків.

– Проведення транзакцій: Після підтвердження виконання перевезення або страхових виплат, смарт-контракт автоматично ініціює фінансові операції, що включають як розрахунки між сторонами, так і виплати відповідних сум.

– Опціональне фінансування: У разі потреби банк може ініціювати операції з фінансування (лізингові чи кредитні операції) під заставу товару, причому умови таких операцій інтегровані в смарт-контракт і активуються за наявності відповідних тригерів.

Банк має право ініціювати та підтверджувати фінансові транзакції, а також переглядати статус перевезення й акти виконаних робіт, що дозволяє здійснювати контроль за відповідністю операцій умовам контракту. Зміни логістичних або страхових даних здійснювати банк не може.

7. Отримувач (Consignee)

Функціональні обов'язки:

– Підтвердження отримання вантажу: Отримувач реєструє факт отримання вантажу за допомогою смарт-контракту, що автоматично оновлює відповідний статус із зазначенням часу завершення доставки.

– Ініціювання претензій: У разі виявлення пошкоджень або невідповідності умов доставки, отримувач може активувати процедури претензій через смарт-контракт. Це дозволяє автоматично повідомити страхову компанію та інші зацікавлені сторони про необхідність проведення страхових процедур.

– Закриття договору: Після підтвердження факту отримання вантажу та відсутності претензій, смарт-контракт автоматично ініціює процес закриття угоди, що забезпечує фінальну документацію всіх виконаних зобов'язань.

Отримувач має право переглядати більшість логістичних і митних даних, проте редагування цих даних заборонене. Єдиною змінюваною інформацією є відмітка про отримання або зауваження щодо стану вантажу, які автоматично фіксуються в смарт-контракті.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у детальній структуризації ролей, яка відрізняється від підходів попередніх досліджень [7, 10, 11], де здебільшого окреслювалися лише узагальнені ти-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

пи стейкхолдерів. Запропоновано перелік із семи ролей із чіткою деталізацією їх функцій. Крім того, інтеграція з концепцією смарт-контрактів реалізована через розробку методу формального опису повноважень і обов'язків кожної ролі, що дозволяє безпосередньо втілити ці правила у програмну логіку розподіленого реєстру.

Практичне значення даної роботи полягає в тому, що розроблена рольова модель із інтеграцією смарт-контрактів створює сприятливі умови для впровадження блокчейн-технологій у сферу вантажних перевезень.

Отримані результати мають практичну цінність для логістичних операторів, розробників програмного забезпечення та консалтингових компаній, оскільки запропонована модель може стати основою для розробки спеціалізованих рішень, що інтегрують смарт-контракти у існуючі логістичні системи. Це, в свою чергу, полегшує процес цифровізації та адаптації бізнес-процесів до сучасних вимог ринку, сприяє підвищенню безпеки операцій і забезпечує можливість швидкого масштабування системи у відповідь на зміни в ринкових умовах. Таким чином, запропонована рольова модель не лише сприяє оптимізації операцій у сфері вантажоперевезень, а й є важливим кроком на шляху до впровадження інноваційних технологій у логістику.

Висновки

У роботі розроблено детальну рольову модель для учасників вантажних перевезень, інтегровану з концепцією смарт-контрактів, прове-

дено комплексний аналіз ролей учасників вантажних перевезень. Запропонована модель чітко формалізує функції, права та обов'язки кожного учасника, що забезпечує не лише ефективно взаємодію між сторонами, а й створює передумови для автоматизації та оптимізації бізнес-процесів за допомогою блокчейн-технологій.

Розроблена рольова модель дозволяє автоматизувати процеси укладення й виконання контрактів, що суттєво скорочує час обробки документів, підвищує прозорість операцій і знижує операційні витрати. Завдяки інтеграції смарт-контрактів кожен суб'єкт має змогу діяти в межах чітко визначеної компетенції, що сприяє підвищенню прозорості операцій і зміцненню довіри між учасниками логістичного ланцюга.

Практична цінність дослідження полягає у можливості впровадження запропонованої моделі в існуючі логістичні системи, що відкриває шлях до цифровізації та модернізації процесів перевезення вантажів.

Розроблена модель створює базу для подальшого розвитку методів контролю доступу, а також для аналізу правових аспектів укладення і виконання смарт-контрактів у вантажних перевезеннях та сприяє інтеграції інноваційних технологій у сферу вантажних перевезень, оптимізуючи процеси взаємодії між учасниками логістичного ланцюга та забезпечуючи надійну, прозору та ефективну систему управління контрактами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лаврухін О. В., Миронець С. Р., Богомолів В. А. Удосконалення технології управління рухом поїздів на основі абстрактного моделювання оперативних процесів. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 3–4(99–100). С. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276194>
2. Aleksieva V., Valchanov H., Haka A., Dinev D. Logistics Model Based on Smart Contracts on Blockchain and IoT. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 41, No. 1. P. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2023041008>
3. Alshahrani A., Khedr A., Belal M., Saleh M. A Smart Contract Approach for Efficient Transportation Management. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2024. Vol. 15, No. 10. P. 728–736. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0151074>
4. Alqarni M. A., Alkathairi M. S., Chauhdary S. H., Saleem S. Use of Blockchain-Based Smart Contracts in Logistics and Supply Chains. *Electronics*. 2023. Vol. 12, No. 6. 1340. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12061340>

5. Baygın M., Yaman O., Baygın N., Karakoş M. A blockchain-based approach to smart cargo transportation using UHF RFID. *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 188. 116030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116030>
6. Casino F., Dasaklis T. K., Patsakis C. A systematic literature review of blockchain-based applications: current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*. 2019. Vol. 36. P. 55–81. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
7. Francisco K., Swanson D. The supply chain has no clothes: technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*. 2018. Vol. 2, No. 1. P. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics2010002>
8. Tian F. A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things. *2017 International Conference on Service Systems and Service Management: Proceedings of the International Conference (ICSSSM 2017)* (Dalian, PRC, 16-18 June 2017). Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, 2017. P. 1–6. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996119>
9. Vovchak O., Veres Z. Enhancing IoT-driven logistics solutions using blockchain-based smart contracts. *Information Systems and Networks*. 2025. Vol. 17. P. 319–329. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2025.17.319>
10. Wang Y., Singgih M., Wang J., Rit M. Making sense of blockchain technology: How will it transform supply chains? *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 211. P. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.002>
11. Zhao G., Liu S., Lopez C., Lu H., Elgueta S., Chen H., Boshkoska B. M. Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*. 2019. Vol. 109. P. 83–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002>

Y. A. VELEHURA^{1*}, V. M. HORIACHKIN^{2*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 051 06 35, e-mail velehura@gmail.com, ORCID 0009-0008-2656-8274

^{2*}Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 972 52 55, e-mail v.m.horiachkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8952-952X

Application of Smart Contracts in the Formalization of Roles in Freight Transportation Systems

Purpose. The aim of the study is to develop a detailed role model for the implementation of smart contracts in the logistics processes of freight transportation, which will enable the automation of interaction between participants and increase the transparency of operations. **Methodology.** To achieve the stated goal, a systemic approach using context-role analysis was applied. The study involves a detailed decomposition of the stages of the logistics chain when applying smart contracts, identification of key participants, and definition of their functions, rights, and responsibilities. This approach makes it possible to clearly delineate areas of responsibility, reduce the risk of conflicts, and ensure the transparency of each participant's actions. The developed UML diagram demonstrates the sequence of interactions between subjects, and the integration of smart contracts ensures the automation and immutability of operations. **Findings.** A comprehensive analysis of logistics processes using smart contracts was carried out, which made it possible to define the rights and responsibilities for seven basic roles of logistics operation participants. This approach provides a holistic view of the system and makes it possible to describe the logic of interactions between subjects. The developed model demonstrates the automation of contract conclusion and execution, which contributes to the reduction of document processing time, optimization of operations, and ensuring a high level of data security in the distributed ledger. **Originality.** An approach is proposed that enables the integration of formalized roles of freight transportation participants with smart contract technology. The detailed structuring of the functional responsibilities of each role makes it possible to implement the program logic of a decentralized system, which significantly expands the possibilities of automated logistics process management. The approach is universal and can be adapted to different types of logistics scenarios. **Practical value.** The developed role model creates favorable conditions for the implementation of blockchain solutions in the field of freight transportation, which makes it possible to digitalize logistics processes, increase trust between supply chain participants, and reduce operational costs. The obtained results have practical application for logistics operators, software developers, and consulting

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

companies that seek to modernize existing transportation management systems. The model can also be useful for educational purposes in the fields of logistics, computer science, and management.

Keywords: information system; smart contract; blockchain; role-based model; freight transportation; logistics; process modeling

REFERENCES

1. Lavrukhin, O. V., Myronets, S. R., & Bohomolov, V. A. (2022). Udoskonalennia tekhnolohii upravlinnia rukhom poizdiv na osnovi abstraktnoho modeliuвання operatyvnykh protsesiv. *Science and Transport Progress*, 3-4(99-100), 25-32. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276194> (in Ukrainian)
2. Aleksieva, V., Valchanov, H., Haka, A., & Dinev, D. (2023). Logistics Model Based on Smart Contracts on Blockchain and IoT. *Engineering Proceedings*, 41(1), 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2023041008> (in English)
3. Alshahrani, A., Khedr, A., Belal, M., & Saleh, M. (2024). A Smart Contract Approach for Efficient Transportation Management. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(10), 728-736. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0151074> (in English)
4. Alqarni, M. A., Alkathiri, M. S., Chauhdary, S. H., & Saleem, S. (2023). Use of Blockchain-Based Smart Contracts in Logistics and Supply Chains. *Electronics*, 12(6), 1340. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12061340> (in English)
5. Baygin, M., Yaman, O., Baygin, N., & Karakoş, M. (2022). A blockchain-based approach to smart cargo transportation using UHF RFID. *Expert Systems with Applications*, 188, 116030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116030> (in English)
6. Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55-81. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006> (in English)
7. Francisco, K., & Swanson, D. (2018). The supply chain has no clothes: technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*, 2(1), 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics2010002> (in English)
8. Tian, F. (2017, June). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things. In *2017 International Conference on Service Systems and Service Management: Proceedings of the International Conference (ICSSSM 2017)* (pp. 1-6). Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, USA. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996119> (in English)
9. Vovchak, O., & Veres, Z. (2025). Enhancing IoT-driven logistics solutions using blockchain-based smart contracts. *Information Systems and Networks*, 17, 319-329. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2025.17.319> (in English)
10. Wang, Y., Singgih, M., Wang, J., & Rit, M. (2019). Making sense of blockchain technology: How will it transform supply chains? *International Journal of Production Economics*, 211, 22-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.002> (in English)
11. Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*, 109, 83-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.05.2025

Прийнята до друку: 23.09.2025

УДК 004.421:[519.6+519.87]

Т. А. ЗАЙЦЕВА^{1*}

^{1*}Каф. комп'ютерних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49045, тел. +38 (097) 534 29 68, ел. пошта ztan2004@ukr.net, ORCID 0000-0002-6346-3390

Обернене моделювання механіки конструкційного контакту із застосуванням методу скінченних елементів

Мета. Дослідження спрямовано на розробку і розв'язання оберненої контактної задачі для двох пружних тіл з різною жорсткістю, яка дозволяє ідентифікувати параметри взаємодії, включаючи зони тертя, зчеплення, ковзання та відриву. Формується варіаційна математична модель з урахуванням некоректності задачі за Адамаром, а також розробляється скінченно-елементна модель. Застосування ANSYS із автоматизацією через APDL забезпечує реалізацію оберненого моделювання, з урахуванням складної поведінки системи під зовнішнім навантаженням. **Методика.** Основою дослідження є поетапний підхід до побудови оберненої контактної задачі з урахуванням переходів між режимами взаємодії (зчеплення, ковзання, відрив), математичної формалізації та чисельного моделювання засобами скінченно-елементного аналізу в ANSYS. Спочатку формується пряма задача, на основі її аналізу – обернена, метою якої є визначення невідомих параметрів взаємодії. Далі розробляється скінченно-елементна модель та здійснюється аналіз результатів. **Результати.** У ході дослідження сформульовано обернену контактну задачу для двох деформівних тіл з різною жорсткістю, яка враховує режими зчеплення, ковзання та відриву. Розроблено скінченно-елементну модель у середовищі ANSYS з використанням контактних елементів, параметризації та автоматизації розрахунків. Отримані результати дали змогу ідентифікувати параметри взаємодії та оцінити механіку системи під навантаженням. **Наукова новизна.** У дослідженні запропоновано інтегрований аналітико-програмний підхід до розв'язання оберненої контактної задачі для тіл з різними механічними характеристиками, що враховує зони зчеплення, ковзання та відриву. Новизна полягає у поєднанні варіаційної математичної постановки задачі з регуляризациєю Тихонова та скінченно-елементним аналізом, автоматизованим через APDL-скрипти у середовищі ANSYS. **Практична значимість.** Розроблена методика вирішення оберненої контактної задачі на основі аналітичного підходу та реалізації в середовищі ANSYS є ефективним інструментом для аналізу складних механічних систем. Алгоритм дозволяє ідентифікувати параметри контактної взаємодії (тертя, зони зчеплення, ковзання, відриву) на основі фактичних умов навантаження. Інтеграція скриптової автоматизації через APDL забезпечує гнучке налаштування моделі та її застосування в практиці машинобудування, авіації, біомеханіки та інших галузях, де точність контактного моделювання є критично важливою.

Ключові слова: математична модель; обернене моделювання; скінченно-елементна модель; контактна взаємодія; тертя; ковзання; зчеплення; відрив; ANSYS; метод Ньютонів

Вступ

У сучасному машинобудуванні та залізничному транспорті задачі контактної взаємодії конструктивних елементів відіграють ключову роль у забезпеченні довговічності та безпечної експлуатації технічних систем. Особливу складність становлять випадки взаємодії деталей із відмінними механічними характеристиками, що ускладнюється впливом технологічних допусків, агресивного середовища, а також геометричних змін, спричинених експлуатацією. В таких умовах виникає необхідність у застосуванні чисельного моделювання контактної механіки з урахуванням ефектів зчеплення, ковзання та відриву.

Зазначене моделювання дає змогу адекватно оцінити напружено-деформований стан відповідальних елементів конструкцій та забезпечити їхню надійність, зокрема, в умовах експлуатації рухомого складу. Особливу увагу привертають обернені контактні задачі, що дозволяють виконувати ідентифікацію геометрії об'єкта, параметрів контакту та особливостей взаємодії на підставі обмеженого обсягу вимірюваних даних [6, 7]. Складність математичного формулювання таких задач обумовлена неповнотою вхідної інформації, нелінійністю фізичних процесів, а також чутливістю до похибок вимірювань. У роботі [8] обґрунтовано підхід до оберненого моделювання задачі вдав-

лення штампа у пружний півпростір з урахуванням тертя, зчеплення та відриву, що має практичну цінність для інженерного аналізу зон контакту. Дослідження [5, 13] пропонують огляд механізмів адаптації контактної геометрії при фретинговому зношуванні, враховуючи режими ковзання та стабілізації зношення, а також акцентують увагу на можливостях тривимірного моделювання складних матеріалів [3].

Окрему групу становлять роботи, присвячені розвитку трибологічних моделей, включно з біотрибологією та методами вдосконалення поверхонь. Зокрема, у [4] розв'язано задачу взаємодії штампа з пружним середовищем, яке характеризується наявністю початкових напружень, а в [9, 11] – реалізовано оптимізаційні постановки задач контактної взаємодії.

Аналіз останніх досліджень засвідчує, що швидкий розвиток технічних систем породжує нові типи задач, які складно або взагалі неможливо розв'язати аналітично, хоча застосування математичного апарату для отримання аналітичних та чисельно-аналітичних рішень – не поодинокі випадки [4, 12, 11].

Взагалі широкого застосування набувають чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів, незважаючи на їхні значні ресурсоемісні характеристики. Застосування сучасних програмних комплексів, зокрема ANSYS [2], довело свою ефективність у моделюванні складних сценаріїв контактної взаємодії та обробці великомасштабних масивів даних [13].

Водночас ведеться активна розробка альтернативних підходів, спрямованих на підвищення точності результатів при зниженні витрат обчислювальних ресурсів. До перспективних напрямів належать інтелектуальні системи, зокрема експертні моделі, які забезпечують автоматизоване виявлення конфліктних сценаріїв використання та корекцію об'єктних моделей [10]. Значного поширення набули нейронні мережі, що успішно застосовуються для задач виявлення пошкоджень конструкцій – від будівельних об'єктів до складних машинобудівних елементів [1]. Синергія експертних систем і нейромереж відкриває нові можливості для високоточних діагностичних і прогностичних моделей технічного стану об'єктів.

Обернені контактні задачі відіграють фундаментальну роль у розвитку сучасних методів

моделювання складних технічних систем. Їхня математична складність, нечіткість вхідних параметрів та обмеженість вимірювань стимулюють розвиток інтелектуальних підходів – експертних систем і нейронних мереж. Особливої ефективності ці методи набувають у поєднанні з чисельними підходами, такими як метод скінченних елементів, що дозволяє деталізувати механіку взаємодії конструкцій. Така синергія сприяє створенню гібридних моделей високої точності для діагностики та прогнозування технічного стану. В результаті, обернені задачі стають основою цифровізації інженерного аналізу та інноваційного розвитку промисловості.

Мета

У межах дослідження необхідно сформулювати та розв'язати обернену контактну задачу для двох пружних тіл з різною жорсткістю, в якій визначаються параметри системи, що забезпечують відповідність контактних умов моделям з зонами тертя, зчеплення, ковзання та відриву.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- побудувати математичну модель оберненої задачі як варіаційної;
- побудувати скінченно-елементну модель, яка описує контактну механіку тіл з урахуванням переходів між режимами взаємодії: зчеплення, ковзання, тертя;
- ітераційне уточнення геометрії та параметрів тертя за результатами чисельного аналізу, з урахуванням умов закону Кулона;
- реалізувати алгоритм у програмному середовищі ANSYS із застосуванням контактних елементів, параметризації геометрії та скриптової автоматизації через APDL.

Методика

Розглядається плоска контактна задача для двох прямокутних областей різної жорсткості. Один із прямокутників защемлений по одній із граней, на протилежній грані розташовується другий прямокутник, який притискається до першого нормальною силою.

Нехай $\Omega_k \in R^2$ – область з регулярною границею Γ , де $\Gamma = \Gamma_0^k \cup \Gamma_c^k, \Gamma_0^k$ – зовнішня, Γ_c – границя контакту, $k = 1, 2$,

$$\Omega: \{ \Omega, x = (x_1, x_2), -l_1 \leq x_1 \leq l_1, -l/2 \leq x_2 \leq l/2 \},$$

$$\Omega = \sum_k \Omega_k.$$

Крайова задача, що описує деформування розглядуваної системи, має вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^{(k)}}{\partial x_j} = f_i^{(k)} \text{ в } \Omega_k, k = 1, 2.$$

де

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^{(k)} &= \frac{\partial u_i^{(k)}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^{(k)}}{\partial x_i}; \\ \sigma_{ij}^{(k)} &= C_{ijkm}^{(k)} \varepsilon_{km}^{(k)}(u); \\ C_{ijkm}^{(k)} &= C_{jimk}^{(k)} = C_{kmij}, \end{aligned} \quad (1)$$

де i, j, k, m – тензорні індекси, які позначають напрямки в просторі та використовуються для опису компонент фізичних величин; $u^{(k)} = (u_1^{(k)}, u_2^{(k)})$ – вектор переміщень; $\{\sigma_{ij}^{(k)}\}$ – тензор напружень; $f_2^1 = A\delta(x_1 - l_1, x_2)$, де δ – дельта функція Дірака.

Прийнято виконувати сумування за повторюваними індексами.

Граничні умови мають вигляд:

$$u_1|_{\Gamma_0^1} = 0, u_2|_{\Gamma_0^1} = 0. \quad (2)$$

На контактній поверхні $\Gamma_c (x_1 = 0)$:

$$u_2^{(k)} \leq 0, \sigma_{22}^{(k)} \leq 0, u_2^{(k)} \cdot \sigma_{22}^{(k)}|_{\Gamma_c} = 0. \quad (3)$$

У зоні зчеплення Γ_c :

$$u_2^1 = u_2^2, u_1^1 = u_1^2 = 0; \quad (4)$$

$$\left| \sigma_{12}^{(k)} \right| < K \left| \sigma_{22}^{(k)} \right|, \quad (5)$$

де K – коефіцієнт тертя.

В зоні ковзання Γ_{cc} замість умови (5) виконуються умови:

$$\left| \sigma_{12}^{(k)} \right| - K \left| \sigma_{22}^{(k)} \right| \geq 0. \quad (6)$$

За виконання умов $\sigma_{22} > 0$ маємо відрив, і тоді маємо:

$$\sigma_{22} = 0, \sigma_{12} = 0. \quad (7)$$

Постановка оберненої задачі. Нехай у зоні контакту у результаті рішення задачі (1)–(4) в деякій області (областях) $\alpha_1^{(P)} \leq x_2 \leq \alpha_2^{(P)}$ умова (5) і (або) умова $\sigma_{22}^{(k)} \leq 0$ не виконується. Припускаємо, що для виконання закону Кулона (6) необхідно визначити зміну $\tilde{U}^{(m)}$ отриманого рішення $U^0(x)$ задачі (1)–(4) з урахуванням (6).

Подамо розв'язок задачі (1)–(4), (6) у вигляді суми двох станів:

$$U^{(m)}(x) = U^0(x) + \tilde{U}^{(m)}(x),$$

де $U^0(x)$ – вектор-функція, що описує напружено-деформівний стан при повному зчепленні; $\tilde{U}^{(m)}(x)$ – вектор-функція, що описує додатковий стан, який виникає внаслідок існування зон ковзання та відриву.

Значення дотичних напружень $\sigma_{12}^{(m)}(U^0(x), \tilde{U}^{(m)}(x))$, можуть бути обчислені з рівнянь (1)–(4). Ці напруження повинні задовольняти умовам $\sigma_{12}^{(m)} = K\sigma_{22}^{(m)}$ в зоні $\Gamma_{cc} (\alpha_1 \leq x_1 \leq \alpha_2, x_2 = 0)$ та умові (5) або (7) у областях – $L \leq x_1 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq x_1 \leq L$ (при $P=1$). Отже, розв'язання задачі зводиться до визначення координат α_1, α_2 і функцій $\tilde{U}^{(m)}(x)$.

Сформулюємо задачу визначення функції $\tilde{U}^{(m)}(x)$ як обернену, у якій додатковими умовами виступають (6), (7).

Функція $\tilde{U}^{(m)}(x)$ однозначно визначається крайовою задачею (1)–(4) при $f_1 = f_2 = 0$

і $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}(x)|_{\Gamma_c} = \tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}$, застосуємо як невідому функцію оберненої задачі функцію $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}$.

Введемо множину W як:

$$W = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}(x) \in C_{\Gamma_c}^2, x \in \Gamma_c, \tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \in H_{\Gamma_c}^{(3/2)}, \\ \frac{\partial \tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}}{\partial n} \in H_{\Gamma_c}^{(1/2)} \underline{u} \leq \tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \leq \bar{u} \end{array} \right\}, \quad (8)$$

де n – нормаль к поверхні, $H_{\Gamma_k}^{(m/p)}$ – простір, що визначається як замикання множини C_{Γ}^2 в нормі, де похідні задовольняють умові Гельдера.

Множина W (8) є компактом у просторі $H_{\Gamma_c}^{(m/p)}$, отже, з будь-якої послідовності $\{\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}\} \subset W$ можна вибрати хоча б одну послідовність $\{\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m_n)}\} \subset \{\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}\}$, яка сходиться в нормі просторів $H_{\Gamma_c}^{(m/p)}$ до деякого елементу $\tilde{U}_{\Gamma_c} \in W$.

Оскільки задача не задовольняє критеріям коректності в сенсі Адамара, до її розв'язання застосуємо концепцію квазірозв'язку, запропоновану Тихоновим [7, 8]. Тоді шукану функцію $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}(x)$ визначаємо як таку, що задовольняє відповідну умову:

$$U_{\Gamma_c}^{(m)}(x) = \arg \min J(\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}), \tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \in W, \quad (9)$$

$$\text{де } J = \int_{\Gamma_{cc}} (\sigma_{12}^{(m)} - k\sigma_{22}^{(m)})^2 d\Gamma.$$

Скористаємося наступними твердженнями, аналогічно до [7, 8].

1. Якщо $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \in W$ та $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \rightarrow \tilde{U}_{\Gamma_c}$ в нормі $H_{\Gamma_c}^{(m/p)}$ то послідовність $\{\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}(\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)})\}$ задачі (1)–(5) слабо збігається до наближеного розв'язку цієї задачі та $\sigma_{ij}^{(m)}(\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)})$ слабо збігається до $\sigma_{ij}(\tilde{U}_{\Gamma_c})$.

2. Функціонал J є неперервним, тобто при $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \rightarrow \tilde{U}_{\Gamma_c}$ має місце $J(\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}) \rightarrow J(\tilde{U}_{\Gamma_c})$, а отже, згідно з теоремою Вейерштраса, задача його мінімізації має щонайменше одне розв'язання.

3. Має місце топологічна лема, тобто якщо послідовність $\{\sigma_{12}^{(m)}(\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)}) - K\sigma_{22}^{(m)}(\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)})\}$ збігається до мінімального значення, то послідовність $\tilde{U}_{\Gamma_c}^{(m)} \rightarrow \tilde{U}_{\Gamma_c}$.

Узагальнена схема алгоритму.

1. Перший крок алгоритму передбачає встановлення необхідних початкових параметрів, серед яких P (де P – кількість допустимих станів системи), $U_1|_{\Gamma_c} = 0$, K – коефіцієнт тертя, $e \ll 1$, $d \ll 1$ (де d , e – заздалегідь визначені похибки), $n = 0$ (де n – крок розрахунку), α (де α – розрахунковий зональний коефіцієнт).

2. На наступному кроці здійснюється побудова множини допустимих станів системи – J . Визначаємо вектор U^0 , обчислення $\sigma_{12j}^0, \sigma_{22j}^0$ в точках j_p , $p = \overline{1, P}$.

$$3. \text{Здійснюємо визначення } K_{\max} = \max \left| \frac{\sigma_{22j}^0}{\sigma_{12j}^0} \right|.$$

$$4. \text{Визначаємо } \Delta_j^{(m)} = \left| \sigma_{12j}^{(m)} - K^{(n)} \sigma_{22j}^{(m)} \right|, \quad j = 1, P$$

5. Формуємо відповідні множини j^0 , j^T , обчислюємо вектор μ_{j_p} , $j = 1, P$.

$$6. \text{Формуємо вектор } \overline{U}^{(m)} = \{U_1^{(m)}, \dots, U_P^{(m)}\}$$

7. Визначаємо вектор $\tilde{U}_{\Gamma_k}^{(m)}$ методом Н'ютона, перевіряємо виконання умов $\|\tilde{U}_{\Gamma_k}^{(m)} - \tilde{U}_{\Gamma_k}^{(m-1)}\| \leq d$.

8. За умови виконання $|K^{(n)} - K| \leq e$, переходимо на кінець, якщо ні, то переходимо на 9.

9. Переходимо на новий крок розрахунків $n = n + 1$.

$$10. K_{nom}^{(n)} = K^{n-1} - \alpha K_{nom}^{n-1}$$

11. Перехід на п. 4.

Для зручності індекс (n) у функціях опущено.

Результати

Програмний комплекс ANSYS було обрано як базову платформу для реалізації оберненої задачі з огляду на його прийнятну точність у розрахунках, гнучкість у налаштуванні контактних умов, а також можливість інтеграції з методами оптимізації та регуляризації. Використовувалась академічна версія ANSYS STUDENT 2025 R2 [2], яка надає безкоштовний доступ до програмного комплексу. ANSYS забезпечив підтримку нелінійних контактних взаємодій, включаючи тертя, ковзання, зчеплення. Для реалізації оберненої задачі в ANSYS використовувалися контактні елементи (CONTA174, TARGE170) з налаштуванням коефіцієнта тертя, умов зчеплення та допуску на ковзання. CONTA174 – це 3D контактний елемент, який моделює контакт і ковзання між деформованими поверхнями. Він підтримує ізотропне та ортотропне тертя, а також дозволяє враховувати розрив зчеплення або деламінацію. Елемент TARGE170 такий що представляє цільову поверхню для контакту. Він може бути жорстким або деформованим, і використовується для парного контакту або загального контакту. У парному визначенні контакту ці елементи зв'язуються через спільний набір реальних констант, що дозволяє точно налаштувати коефіцієнт тертя, допуск на проникнення, умови зчеплення тощо.

Також була застосована параметризація геометрії та матеріалів, що дозволило працювати з моделлю протягом ітераційного процесу. Геометрія моделі (положення зон тертя, ковзання, зчеплення) були задані як параметри, які можна змінювати на різних кроках ітерацій.

Це дозволило реалізувати обернену задачу: змінюючи параметри у Workbench через Design Parameters,

Скриптова автоматизація APDL (ANSYS Parametric Design Language) дозволила створити цикл ітерацій, у якому:

- мінялися необхідні параметри моделі;
- виконувалися розрахунки;
- збиралися результати (контактні напруження, переміщення);
- обчислювався функціонал нев'язки;
- перевірялися умови збіжності.

Також у межах дослідження було здійснено альтернативний підхід до чисельного моделювання контактної взаємодії між двома тілами з урахуванням зон зчеплення, тертя та ковзання. Для цього було побудовано деталізовані геометричні моделі контактуючих поверхонь, які відображають майже реальні умови експлуатації. Контактні елементи в моделі дозволили врахувати нелінійність взаємодії, зокрема умови зчеплення до досягнення критичного рівня дотичних напружень, після чого спостерігалось ковзання. У зонах зчеплення дотичні переміщення були відсутні, що відповідало умовам повного контакту між тілами. У протилежному випадку, при перевищенні граничного тертя, виникали зони ковзання з наявністю відносного руху. Контактна взаємодія моделювалася з урахуванням тертя, описаного за законом Кулона, де коефіцієнт тертя задавався параметрично, що забезпечувало адаптивність моделі до змінних умов. Розподіл контактної тиску, дотичних сил та переміщень оцінювався на основі результатів скінченно-елементного аналізу. Особлива увага приділялася переходу між умовами контакту (рис. 1–4).

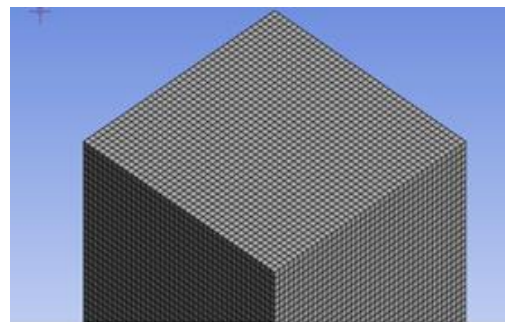


Рис. 1. Приклад контактної поверхні з елементами моделювання зон тертя, зчеплення та ковзання за рахунок вбудованих функціональних можливостей ANSYS

Fig. 1. Contact surface example with friction, adhesion, and sliding zones modeled via ANSYS's integrated functionality

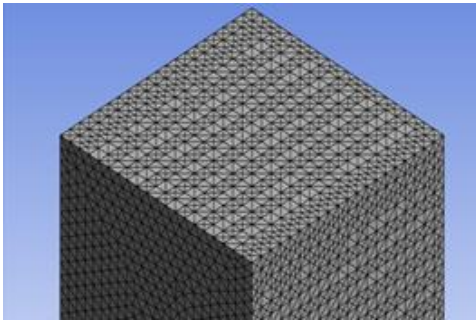


Рис. 2. Приклад деталізованої контактної поверхні з елементами моделювання зон тертя, зчеплення та ковзання за рахунок вбудованих функціональних можливостей ANSYS

Fig. 2. Detailed contact surface with friction, adhesion, and sliding zones modeled via ANSYS tools

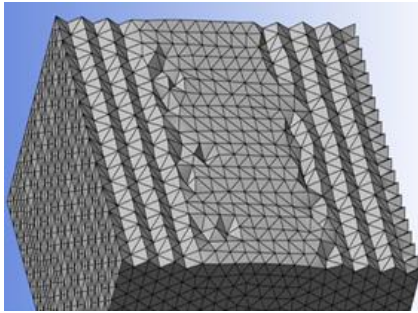


Рис. 3. Приклад контактної поверхні зі складними окремо фізично змодельованими зонами тертя, зчеплення та ковзання, а також за рахунок вбудованих функціональних можливостей ANSYS

Fig. 3. Contact surface example with distinct friction, adhesion, and sliding zones, modeled via ANSYS tools and complex interface geometry

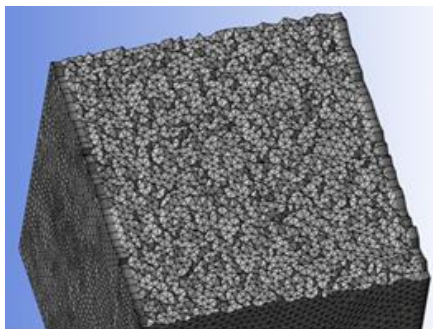


Рис. 4. Приклад відтворення складної поверхні контакту з елементами моделювання зон тертя, зчеплення та ковзання за рахунок вбудованих функціональних можливостей ANSYS

Fig. 4. Contact surface example with friction, adhesion, and sliding zones, modeled using ANSYS and complex interface geometry

Рисунки 1–4 ілюструють геометричну конфігурацію контактних поверхонь між двома деформівними тілами з різною жорсткістю, що моделюються в ANSYS з урахуванням зон зчеплення, ковзання та відриву. Використані комбінації контактних елементів різних типів, забезпечують реалізацію різних режимів взаємодії. Завдяки складній архітектурі поверхні та комбінації типів контактних елементів, досягається більш адекватне чисельне відтворення фізичних процесів, включаючи локальні переходи між режимами контакту. Таким чином, модель відтворює складну механічну поведінку контактної пари в умовах зовнішнього навантаження.

На рис. 5 наведено приклад ідентифікації зон контактної взаємодії між тілами під навантаженням, зокрема ділянок відриву, тертя, зчеплення та ковзання. Модель побудована з використанням вбудованих функціональних можливостей ANSYS, що дозволяє точно відтворити різні режими взаємодії. Зони тертя позначені кольоровими ділянками, які відображають характер контактної поведінки; область з найбільшим навантаженням візуалізована червоним кольором. Отримані результати є важливими для верифікації чисельної моделі та подальшого формулювання оберненої задачі, спрямованої на визначення параметрів системи.

У якості прикладу наведемо результати розв'язку класичної задачі про вдавнення і зсув жорсткого штампа в пружний півпростір (плоска задача) з механічними характеристиками $E = 200$ ГПа, $\nu = 0,3$. Навантаження здійснювалося кінематично, до визначеного заглиблення $\delta_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ мм та зміщення $\delta_2 = 10^{-3}$ мм. Відношення розмірів l/H склало 0,3, де H – розмір, що характеризує скінченно-елементну модель півпростору; l – розмір зони контакту.

Скінченно-елементне розбиття здійснювалося шляхом автоматичного вибору кроку сітки для досягнення заданої відносної похибки 0,02 з деталізованою контактною поверхнею з елементами моделювання зон тертя, зчеплення та ковзання за рахунок вбудованих функціональних можливостей ANSYS.

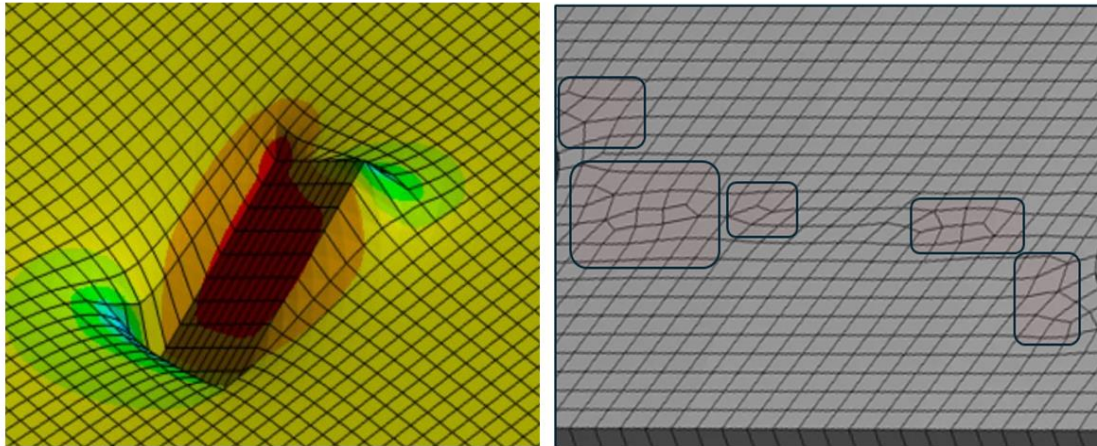


Рис. 5. Приклади ідентифікації ділянок відриву, зон тертя, зчеплення та ковзання

Fig. 5. Examples of contact surfaces between interacting bodies, incorporating elements of friction, adhesion and sliding zone modeling

На рис. 6 представлена залежність розміру зони зчеплення a від коефіцієнта тертя k (суцільна лінія). Цей результат достатньо близький з результатами, отриманими Л. І. Галінім і В. І. Мосаковським [8] (пунктирна крива).

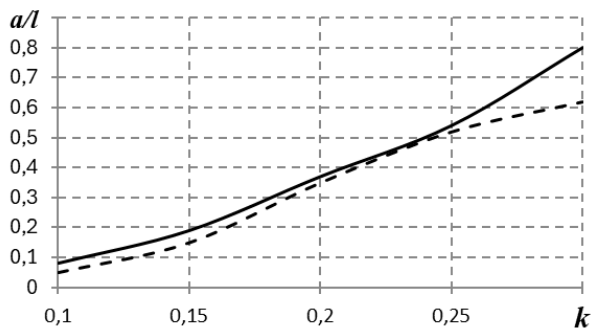


Рис. 6. Залежність розміру зони зчеплення від коефіцієнта тертя

Fig. 6. Dependence of the adhesion zone size on the coefficient of friction

Наукова новизна та практична значимість

У дослідженні запропоновано інтегрований аналітико-програмний підхід до розв'язання оберненої контактної задачі для тіл з різними механічними характеристиками, що враховує

зони зчеплення, тертя, ковзання та відриву. Новизна полягає у поєднанні варіаційної математичної постановки задачі з регуляризацією Тихонова та скінченно-елементним аналізом, автоматизованим через APDL-скрипти у середовищі ANSYS. Створено ітераційний алгоритм адаптивного уточнення геометричних і фізичних параметрів моделі, який забезпечує ідентифікацію контактних умов та відтворення складної механіки взаємодії системи, з можливістю застосування в широкому класі інженерних задач.

Розроблена методика вирішення оберненої контактної задачі на основі аналітичного підходу та програмної реалізації в середовищі ANSYS є сучасним інструментом для інженерного аналізу складних механічних систем. Алгоритм дозволяє ідентифікувати контактні параметри (коефіцієнти тертя, зони зчеплення та ковзання) на основі фактичних умов навантаження, що має значення для оптимізації конструкцій, підвищення їх надійності та оцінки залишкового ресурсу. Інтеграція скриптової автоматизації через APDL забезпечує гнучке налаштування моделі та її застосування в практиці машинобудування, авіатехніки, біомеханіки та інших галузях, де точність контактної взаємодії є важливою.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило ефективність запропонованого підходу до розв'язання оберненої контактної задачі для пружних тіл із різними механічними характеристиками, що моделюються у середовищі ANSYS. Формалізація задачі як варіаційної крайової проблеми з урахуванням її некоректності дозволила застосувати Тихонівську регуляризацию, забезпечивши стійкість та збіжність отриманих розв'язків.

Реалізована скінченно-елементна модель з параметризацією геометрії та фізичних властивостей, поєднана з автоматизованим циклом обчислень через APDL, дала змогу:

– ідентифікувати зони зчеплення, ковзання та відриву;

– обчислювати контактні напруження, переміщення та розподіл дотичних сил.

Запропонована методика продемонструвала можливість для застосування в галузях машинобудування, залізничній, у біомеханіці та інших сферах, де контактна взаємодія відіграє критично важливу роль у забезпеченні точності та надійності конструкцій.

Таким чином, створена модель та алгоритм розв'язання оберненої задачі становлять інструмент для аналізу механіки контактних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abambres M., Marcy M., Doz G. Potential of Neural Networks for Structural Damage Localization. *Archive ouverte HAL*. 2018. URL: <https://hal.science/hal-02074844v2>
2. Ansys Free Student Software Downloads. *Ansys Inc.* 2025. URL: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>
3. Argatov I., Chai Y. S. Contact Geometry Adaptation in Fretting Wear: A Constructive Review. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 6. 51. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00051>
4. Babych S. Yu. Contact Problem for an Elastic Ring Punch and a Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2021. Vol. 57. P. 297–305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01081-7>
5. Meng Y., Xu J., Jin Z., Prakash B., Hu Y. A review of recent advances in tribology. *Friction*. 2020. Vol. 8(2). P. 221–300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2>
6. Morassi A., Kawano A. Inverse Problems for Mechanical Systems. *Springer*. 2025. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-89979-9>
7. Obodan N. I., Guk N. A. *Inverse Problems in the Theory of Thin Shells*. London : LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. 252 p.
8. Obodan N. I., Zaitseva T. A., Fridman O. D. Contact Problem for a Rigid Punch and an Elastic Half Space as an Inverse Problem. *Journal of Mathematical Sciences*. 2019. Vol. 240. P. 184–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-019-04346-2>
9. Páczelt I., Mróz Z. Optimized punch contact action related to control of local structure displacement. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60(5). P. 1921–1936. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02300-z>
10. Poole D. L., Mackworth A. K. *Artificial Intelligence*. Cambridge : Cambridge University Press. 2010. 622 p. URL: <https://www.cs.ubc.ca/~poole/aibook/html/index.html>
11. Shyshkanova G., Walther A. Simple layer potential expansion for optimization of contact interaction taking into account friction and adhesion. *Journal of Physics : Conference Series*. 2023. Vol. 2675(1). 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2675/1/012033>
12. Shyshkanova G., Zaytseva T., Zhushman V., Levchenko N., Korotunova O. Solving three-dimensional contact problems for foundation design in green building. *Journal of Physics : Conference Series*. 2023. Vol. 2609. № 1. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2609/1/012001>
13. Yue T., Abdel Wahab M. A review on fretting wear mechanisms, models and numerical analyses. *Computers. Materials & Continua*. 2019. Vol. 59(2). P. 405–432. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.04253>

T. A. ZAYTSEVA^{1*}

^{1*}Dep. of Computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49045, tel. +38 (097) 534 29 68, e-mail ztan2004@ukr.net, ORCID 0000-0002-6346-3390

Inverse Modeling of Structural Contact Mechanics Using the Finite Element Method

Purpose. The research aims to develop and solving an inverse contact problem for two elastic bodies with different stiffnesses, enabling the identification of interaction parameters including friction zones, adhesion, sliding, and separation. A variational mathematical model is formulated, A finite element model is constructed. The use of ANSYS, automated via APDL, allows for the implementation of inverse modeling, considering the complex behavior of the system under external loading. **Methodology.** The study is based on a step-by-step approach to constructing the inverse contact problem, considering transitions between interaction modes (adhesion, sliding, separation), mathematical formalization, and numerical modeling using finite element analysis in ANSYS. First, a direct problem is formulated; based on its analysis, an inverse problem is constructed to identify unknown interaction parameters. A finite element model is then created, followed by result analysis. **Findings.** An inverse contact problem for two deformed bodies with different stiffnesses is formulated, taking into account the modes of adhesion, sliding, and separation. A finite element model is created in the ANSYS. **Originality.** The study proposes an integrated analytical-programmatic approach to solving the inverse contact problem for bodies with varying mechanical characteristics, considering zones of adhesion, sliding, and separation. The novelty lies in the combination of a variational mathematical problem formulation with Tikhonov regularization and finite element analysis, automated through APDL scripts within the ANSYS environment. **Practical value.** The developed methodology for solving inverse contact problems based on the analytical approach and its implementation in the ANSYS environment proves to be an effective tool for analyzing complex mechanical systems. The algorithm allows for the identification of contact interaction parameters (friction, adhesion zones, sliding, separation) based on actual loading conditions.

Keywords: mathematical model; inverse modeling; finite element model; contact interaction; friction; sliding; adhesion; separation; ANSYS; Newton's method

REFERENCES

1. Abambres, M., Marcy, M., & Doz, G. (2018). Potential of Neural Networks for Structural Damage Localization. *Archive ouverte HAL*. Retrieved from <https://hal.science/hal-02074844v2> (in English)
2. Ansys Inc. (2025). *Ansys Free Student Software Downloads*. Retrieved from <https://www.ansys.com/academic/free-student-products> (in English)
3. Argatov, I., & Chai, Y. S. (2020). Contact Geometry Adaptation in Fretting Wear: A Constructive Review. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 51. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00051> (in English)
4. Babych, S. Yu., & Yarets'ka, N. O. (2021). Contact Problem for an Elastic Ring Punch and a Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*, 57, 297–305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01081-7> (in English)
5. Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., & Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8(2), 221–300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2> (in English)
6. Morassi, A., & Kawano, A. (2025). *Inverse Problems for Mechanical Systems*. Springer. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-89979-9> (in English)
7. Obodan, N. I., & Guk, N. A. (2012). *Inverse Problems in the Theory of Thin Shells*. London: LAP LAMBERT Academic Publishing. (in English)
8. Obodan, N. I., Zaitseva, T. A., & Fridman, O. D. (2019). Contact Problem for a Rigid Punch and an Elastic Half Space as an Inverse Problem. *Journal of Mathematical Sciences*, 240, 184–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-019-04346-2> (in English)
9. Páczelt, I., & Mróz, Z. (2019). Optimized punch contact action related to control of local structure displacement. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(5), 1921–1936. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02300-z> (in English)
10. Poole, D. L., & Mackworth, A. K. (2010). *Artificial Intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press. Retrieved from <https://www.cs.ubc.ca/~poole/aibook/html/index.html> (in English)

11. Shyshkanova, G., & Walther, A. (2023). Simple layer potential expansion for optimization of contact interaction taking into account friction and adhesion. *Journal of Physics: Conference Series*, 2675(1), 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2675/1/012033> (in English)
12. Shyshkanova, G., Zaytseva, T., Zhushman, V., Levchenko, N., & Korotunova, O. (2023). Solving three-dimensional contact problems for foundation design in green building. *Journal of Physics: Conference Series*, 2609(1), 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2609/1/012001> (in English)
13. Yue, T., & Abdel Wahab, M. (2019). A review on fretting wear mechanisms, models and numerical analyses. *Computers, Materials & Continua*, 59(2), 405–432. <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.04253> (in English)

Надійшла до редколегії: 22.05.2025

Прийнята до друку: 29.09.2025

UDC 519.87:004.8E. M. KISELEVA^{1*}, O. M. PRYTOMANOVA^{2*}, O. O. KUZENKOV^{3*}^{1*}Fac. of Applied Mathematics and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Nauki Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail kiseleva47@ukr.net, ORCID 0000-0003-4303-1707^{2*}Dep. of Mathematical Modeling and Statistics, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Institute Information Technologies in Economics, Beresteiskyi Av., 54/1, Kyiv, Ukraine, 03057, tel. +38 (044) 456 25 93, e-mail prytomanova.olga@kneu.edu.ua, ORCID 0000-0003-1878-6120^{3*}Dep. of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics, Oles Honchar Dnipro National University, Nauki Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail kuzenkov1986@gmail.com, ORCID 0000-0002-6378-7993**Software Implementation of an Algorithm for Solving a Dynamic Problem of Optimal Set Partitioning Under Uncertainty**

Purpose. Among various formulations of the optimal set partitioning (OSP) problem, dynamic variants – where optimization conditions change over time—are of particular interest due to their relevance for real-world applications. Such systems often operate under uncertainty, which may arise from imprecise or incomplete input data, vague parameters, or unreliable mathematical representations of system behavior. This study develops a comprehensive mathematical and computational framework for solving dynamic OSP problems under uncertainty. The aim of the study is to develop software for solving a novel dynamic optimal set partitioning problem under uncertainty, specifically including the formulation of a numerical experiment, the applied interpretation of the obtained results, and a comparative analysis of the numerical experiment outcomes with the analytical results of the model investigation. **Methodology.** The methodological basis of the study consists of the principles of optimal set partitioning theory and fuzzy set theory. Modern numerical methods were used to solve systems of ordinary differential equations necessary for determining the parameters of the dynamic model. **Findings.** The formulation of dynamic optimal set partitioning problems under uncertainty allows including fuzzy model parameters and obtaining results even with incomplete information about the system. The work presents a clearly defined algorithm for solving the problem, determined by its mathematical formulation. **Originality.** The proposed models represent a significant contribution to the development of mathematical modeling, particularly in dynamic and fuzzy problem formulations. Methods and algorithms for solving the formalized problems are presented, and the results of comparative analysis allow assessing the analytical and numerical advantages of both models and the dynamic approach to solving such problems. **Practical value.** The practical value of the results obtained in this study lies in the formulation of a novel dynamic optimal set partitioning problem under uncertainty, the development of software for the numerical implementation of the experiment, and the visualization of the obtained results. The formalized mathematical model and the developed software can be applied to a wide range of practical problems, such as logistics, facility location, partitioning of communities into administrative service centers, and others.

Keywords: dynamic problem; optimal set partitioning theory; fuzzy parameter; neuro-fuzzy technologies; infinite-dimensional mathematical programming; nondifferentiable optimization; artificial intelligence methods

Introduction

Optimal set partitioning (OSP) is a fundamental problem in mathematical modeling, combinatorial optimization, and systems analysis. It involves dividing a set of elements into disjoint subsets such that a given objective function is optimized under specified constraints. Although the classical version of the problem has been extensively studied, practical applications often require consideration of more complex dynamic scenarios involving time-varying parameters, incomplete information, and structural uncertainty.

Dynamic set partitioning problems arise in many fields, including adaptive control, logistics, network planning, and decision support under uncertainty. In such systems, optimization criteria or constraints may change over time, necessitating adaptive partition structures. Input data is often fuzzy, imprecise, or insufficiently defined, rendering traditional deterministic models inadequate.

To address these challenges, hybrid approaches have been proposed that combine optimization theory with artificial intelligence methods such as fuzzy logic, neuro-fuzzy systems, and machine learning. These techniques allow for the representation and processing of uncertain information and

enable dynamic adaptation of the partitioning process.

The aim of this study is to overcome gaps in existing literature: the lack of unified models accounting simultaneously for dynamic processes, uncertainty, and optimality criteria, and the limited application of neuro-fuzzy technologies for real-time partitioning tasks. We propose a new mathematical and computational framework consisting of two main phases: neuro-fuzzy identification to model and reduce uncertainty in input data, followed by mathematical optimization to determine the optimal partition structure under refined conditions.

The method is universal and applicable to clustering, resource allocation, and adaptive decision-making. It extends classical OSP approaches by incorporating quantitative uncertainty assessment and adaptive feedback, opening new perspectives in applied mathematics, artificial intelligence, and mathematical statistics.

Purpose

The purpose of this work is the software implementation for solving a new dynamic optimal set partitioning problem under uncertainty. Within this overall objective, the following tasks were set:

1. formalization of the new dynamic optimal set partitioning problem under uncertainty,
2. development of a solution algorithm,
3. software implementation of the algorithm,
4. analysis of the numerical and analytical results of the study.

Methodology

Dynamic and adaptive partitioning approaches have been studied in works by Lu [11], Kun Yu and Xiang Yu [10, 15], Michael A. Bender and Martín Farach-Colton [5], emphasizing the importance of flexible algorithms in real-world dynamic systems. Robust optimization under uncertainty is addressed by Barzegary and Yoganarasimhan [3], Cheramin, Hocking and Srivastava [8, 13], Moresco [4]. Hybrid frameworks and scenario-based methods were proposed by Zvara and Punyamoorthy [16, 12], Zhang [14], Duong [13]. These works demonstrate that integrating dynamic, adaptive, and probabilistic components leads to more resilient and scalable models.

The theoretical foundations of optimal set partitioning were established in works by Kiselyova O. M. and her school [6, 14], showing that classical Voronoi diagrams are special cases of OSP problems. They developed algorithms for constructing additive and multiplicative Voronoi diagrams under fuzzy uncertainty using neuro-fuzzy technologies [14]. Bulat A. F. proposed a fuzzy mathematical model of set partitioning with center allocation and fuzzy element distribution [6]. These studies provide fundamental theoretical and computational tools for modeling uncertainty in partition structure and serve as a basis for the methodological innovations presented here.

Despite existing achievements, a unified model combining continuous fuzzy partition structure with adaptive real-time optimization and uncertainty handling has not yet been developed. This study aims to fill that gap by proposing a model integrating continuous and fuzzy representations, dynamic adaptation strategies, and optimization under data-driven uncertainty.

The research object is a continuous single-product dynamic optimal set partitioning problem with E_n without constraints, fixed subset center positions, and fuzzy parameters.

The goal is to develop a new model for this problem under uncertainty. Tasks include formulating the problem, developing solution methods and algorithms, and conducting comparative analysis of numerical experiment results.

The work uses optimal set partitioning theory for problem formalization, numerical methods for solving systems of ordinary differential equations (a key component of the model), fuzzy set theory and neuro-fuzzy technologies for posing and solving the fuzzy problem, and computer simulation for obtaining numerical results.

Findings

Problem statement. Let us consider a continuous single-product dynamic problem of optimal partitioning of a set from E_n without constraints with given locations of subset centers [14] in the following form.

Let Ω be a bounded closed Lebesgue measurable set in n -dimensional Euclidean space E_n .

The collection of Lebesgue measurable subsets $\Omega_1, \dots, \Omega_N$ of the set $\Omega \subset E_n$ (which may include

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

empty ones) will be called a possible partition of this set if $\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega$, $\text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0$, $i, j = 1, \dots, N$ ($i \neq j$), where $N > 0$ is a given natural number; $\text{mes}(\cdot)$ is Lebesgue measure.

Let us denote by \sum_{Ω}^N the class of all possible partitions of the set $\Omega \subset E_n$ into a given number N of its Lebesgue measurable subsets:

$$\sum_{\Omega}^N = \left\{ \varpi \equiv \{ \Omega_1, \dots, \Omega_N \} \in \Omega^N : \bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, i, j = 1, \dots, N (i \neq j) \right\}.$$

Next, let us denote by τ_1, \dots, τ_N the collection of certain reference points for the subsets $\Omega_1, \dots, \Omega_N$ respectively, which we will call the centers of these subsets: $\tau_i = (\tau_i^{(1)}, \dots, \tau_i^{(n)}) \in \Omega_i$, $i = 1, \dots, N$, and we will assume that the coordinates of all centers are given.

This work addresses two dynamic optimal set partitioning problems: one with fixed centers of subsets and the other involving the determination of the coordinates of such centers. The formalized statements of these two problems will be presented below.

Formulation of the dynamic problem with fixed centers. It is required to find a partition $\varpi = \{ \Omega_1, \dots, \Omega_N \} \in \sum_{\Omega}^N$ of the set $\Omega \subset E_n$ and a vector function $c(x, \tau, t) = (c_1(x, \tau_1, t), \dots, c_N(x, \tau_N, t))$, defined a.e. for $x \in \Omega$ for a given fixed set of centers $\tau = \{ \tau_1, \dots, \tau_N \} \subset \Omega^N$ and all $t \in [0, T]$, which ensure:

$$\inf_{\varpi \in \sum_{\Omega}^N; c(\cdot, \cdot, \cdot) \in L_2^N(\Omega \times \Omega \times [0, T])} F(\varpi, c(\cdot, \cdot, \cdot)), \quad (1)$$

where:

$$F(\varpi, c(\cdot, \cdot, \cdot)) = \int_0^T \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} (c_i(x, \tau_i, t) \cdot m(x, \tau_i) + a_i) \cdot \rho(x) dx dt, \quad (2)$$

subject to the conditions:

$$\frac{\partial c_i(x, \tau_i, t)}{\partial t} = \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot f_j(c_j(x, \tau_j, t)), \quad 0 \leq t \leq T;$$

$$c_i(x, \tau_i, t_0) = c_{0i}(x, \tau_i) \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

a.e. for $x \in \Omega$, with fixed $\tau_i = (\tau_i^{(1)}, \dots, \tau_i^{(n)}) \in \Omega_i$, $i = 1, \dots, N$, and the closure conditions of the system:

$$\sum_{i=1}^N A_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Here $c_i(x, \tau_i, t)$, $i = 1, \dots, N$, are the desired real-valued functions defined on $\Omega \times \Omega \times [0, T]$, which for any fixed $\tau_i = (\tau_i^{(1)}, \dots, \tau_i^{(n)}) \in \Omega_i$ are continuously differentiable with respect to the argument t on the interval $[0, T]$ a.e. for $x = (x^{(1)}, \dots, x^{(n)}) \in \Omega$, are bounded and measurable with respect to the argument x on Ω for all $t \in [0, T]$. $m(x, \tau_i)$, $c_{0i}(x, \tau_i)$ are given real-valued functions defined on $\Omega \times \Omega$, bounded and measurable with respect to the argument $x \in \Omega$ for any fixed $\tau_i \in \Omega_i$ for all $i = 1, \dots, N$ (in particular, $m(x, \tau_i)$ may play the role of a metric on $\Omega \times \Omega$). $f_i(c_i(x, \tau_i, t))$, $i = 1, \dots, N$, are given real-valued Lipschitz functions on their domain; $\rho(x)$ is a given non-negative function, bounded and measurable on Ω . a_i , $i = 1, \dots, N$, are given, usually non-negative numbers; $0 \leq A_{ij} \leq 1$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, are given numerical parameters; $T > 0$ and $t_0 \in [0, T]$ are given.

Here and henceforth, the integrals are understood in the Lebesgue sense. We will assume that the measure of the set of boundary points of the subsets $\Omega_1, \dots, \Omega_N$ is equal to zero.

A pair $(\varpi^*, c^*(x, \tau, t))$, that delivers the minimal value of functional (2) on the set $\sum_{\Omega}^N \times L_2^N(\Omega \times \Omega \times [0, T])$ subject to constraints (3), (4), we shall consider as an optimal solution to problem (1)–(4). In this case, the partition $\varpi^* = \{ \Omega_1^*, \dots, \Omega_N^* \} \in \sum_{\Omega}^N$ we shall consider as an optimal partition of the set $\Omega \subset E_n$ into N subsets, and the vector function

$$c^*(x, \tau, t) = (c_1^*(x, \tau_1, t), \dots,$$

$c_N^*(x, \tau_N, t)) \in L_2^N(\Omega \times \Omega \times [0, T])$ – as an optimal phase trajectory of the dynamical system in problem (1) – (4).

From a subject-matter point of view, the independent variable $t \in [0, T]$ in the given mathematical formulation of the dynamic optimal partitioning problem can play the role of the time variable, and $T > 0$ and $t_0 \in [0, T]$ are the given final and initial moments of time in the studied dynamic process, respectively. Thus, the functions $f_i(c_i(x, \tau_i, t))$, $i = 1, 2, \dots, N$, in the differential relations (3), which reflect the dynamics of transportation prices, may have different forms, but the inflation/deflation model (5) will be used as the base model in this work.

$$f_i(c_i(x, \tau_i, t)) = d_i \cdot c_i(x, \tau_i, t);$$

$$x \in \Omega, \tau_i = (\tau_i^{(1)}, \dots, \tau_i^{(n)}) \in \Omega_i; \quad (5)$$

$$i = \overline{1, N}, 0 \leq t \leq T.$$

In formula (5) d_i , $i = 1, \dots, N$, are given real coefficients reflecting the tendency of the transportation cost of a unit of product from the i -th center to the consumer to increase/decrease/.

Problem Statement under Uncertainty. In problem (1)–(2) under conditions (3)–(4) (the crisp problem), it was assumed that all parameters are given as constants. However, in practice, the exact values of these constants are usually unknown or specified linguistically (fuzzily). Let us consider the parameters in more detail a_1, \dots, a_N in the objective functional (2), these parameters represent fixed costs for production and transportation tasks. Depending on the circumstances, fixed costs may include factory operation expenses, insurance, and possibly maintaining a minimum number of employees. These costs are constant and remain unchanged regardless of the firm's production volume. However, in many practical production and transportation problems, the values of these parameters (fixed costs) depend on numerous real-world factors not accounted for in the given model. A model with fixed parameter values a_1, \dots, a_N may prove to be too «coarse», since in practice, the known information often consists not of precise

exact parameter values, but sets of their possible values.

To address uncertainty in specifying parameters a_1, \dots, a_N in the objective functional (2), we will consider them as fuzzy variables, which, in turn, depend on fuzzy factors $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$. Such factors for fixed production costs may include the costs of production means, labor, natural resources, and others. Accounting for this additional information complicates the original mathematical model but, nevertheless, it may prove to be acceptably more accurate and adequate because it considers the influence of additional factors on the parameters a_1, \dots, a_N .

To formalize the fuzziness, we will subsequently use neuro-fuzzy technologies. For this purpose, the parameters a_i , $i = 1, \dots, N$, will be represented as parameters dependent on fuzzy factors γ_j , $j = 1, \dots, n$, in the form of

$$a_i \equiv a_i(\gamma_1, \dots, \gamma_n). \quad (6)$$

Then the objective functional (2) with fuzzy parameters (6) can be expressed in the following form:

$$J(\lambda(\cdot), c(\cdot, \cdot, \cdot)) = \int_0^T \int_{\Omega} \sum_{i=1}^N (c_i(x, \tau_i, t) \cdot m(x, \tau_i) + a_i(\gamma_1, \dots, \gamma_n)) \rho(x) \lambda_i(x) dx dt; \quad (7)$$

$$a(\gamma) = \frac{\sum_{k=1}^L d_k \cdot \mu_{D_k}^*(a)}{\sum_{k=1}^L \mu_{D_k}^*(a)}, \gamma \in Y_1 \times \dots \times Y_i \times \dots \times Y_n, \quad (8)$$

where:

$$\mu_{D_k}^*(a) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{S_k} p_j^{k*}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n), \\ \text{if } \sum_{j=1}^{S_k} p_j^{k*}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) \leq 1, \\ 1, \text{ otherwise;} \end{cases} \quad (9)$$

$$p_j^{k*}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) = w_j^{k*} \prod_{i=1}^n \mu_{ij}^{k*}(\gamma_i); \quad (10)$$

$$\mu_{ij}^{k*}(\gamma_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_i - b_{ij}^{k*}}{c_{ij}^{k*}} \right)^2}, \quad (11)$$

$$i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, s_k, k = 1, \dots, L$$

Solution Algorithm. 1. Set Ω we include in n -dimensional parallelepiped Π , whose sides are parallel to the axes of the Cartesian coordinate system. The parallelepiped Π is covered by a rectangular grid.

2. We set the values of the functions $c_{0i}(x, \tau_i)$, $i = 1, \dots, N$, from the initial conditions (3) at the grid nodes.

3. We cover the interval $[0, T]$ with a grid of step size h_t .

4. For each grid node and for each τ_i , $i = 1, \dots, N$ we solve the Cauchy problem for the system of ordinary differential equations (3) over the time interval $[0, T]$ and find the functions $c_i(x, \tau_i, t)$, $i = 1, \dots, N$.

5. We calculate the values of the parameters a_i , $i = 1, \dots, N$, using the formulas (8) – (11).

6. We define the characteristic function $\lambda^*(x)$ at the grid nodes from step 1 with the obtained $c_i(x, \tau_i, t)$, $i = 1, \dots, N$ and the fuzzy parameter values restored in step 5 a_i , $i = 1, \dots, N$.

7. We find the minimum value of the objective functional (2) using the obtained $\lambda^*(x)$ and $c_i^*(x, \tau_i, t)$, $i = 1, \dots, N$.

Results of the numerical experiment. This paragraph presents several pairs from numerous computational experiments conducted for models (1)–(4) and (9)–(11).

To construct the optimal partition, the domain Ω was covered with a rectangular grid with nodes (i, j) , $i, j = 1, \dots, 101$. For the obtained points of the phase trajectory, the transportation cost from each node was calculated (i, j) set Ω for centers τ_1 , τ_2 . Based on the minimum cost criterion, the node (i, j) was assigned to the sets Ω_1 and Ω_2 respectively. The accuracy of the r-algorithm, both for the variables and the subgradient, was the same and amounted to 10^{-4} . Figures 1–3 show the optimal partitioning of the set of consumers Ω_1 , which

has the shape of a square with side length 1, into two subsets with centers $\tau_1(0.5; 0.25)$, $\tau_2(0.5; 0.75)$. The set at the bottom of the figures – Ω_1 ; The set at the top of the figures – Ω_2 .

Figures 1–3, *a* show the optimal partitioning for exact values at $a_1 = 3$; $a_2 = 1$. Figures 1–3, *b* for the restored values before tuning the fuzzy model at $a_1 = 2.6246$; $a_2 = 1.9613$. Figures 1–3, *c* for the restored values after tuning the fuzzy model at $a_1 = 3.0604$; $a_2 = 0.9828$

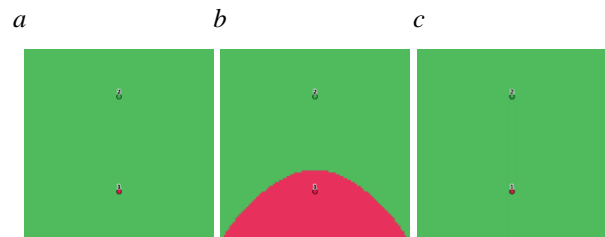


Fig. 1. Optimal partitioning Ω over the time interval $[0; 1]$ at $c_1=4.6967$; $c_2=5.0451$

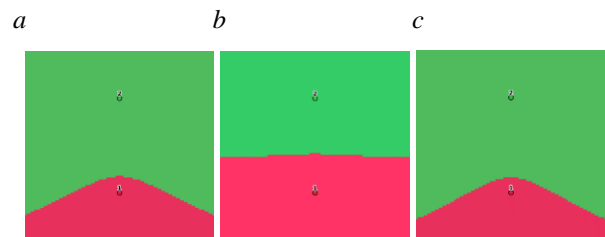


Fig. 2. Optimal partitioning Ω over the time interval $[0; 2]$ at $c_1=11.9758$; $c_2=15.9638$

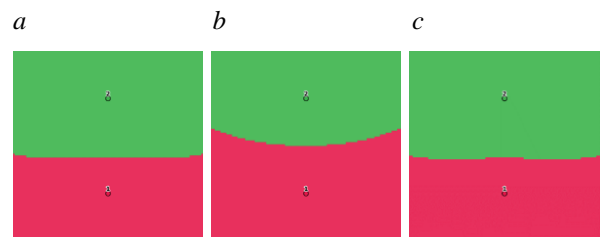


Fig. 3. Optimal partitioning Ω over the time interval $[0; 3]$ at $c_1=29.7873$; $c_2=42.6809$

The numerical results of the algorithm's performance are presented in Table 1 at initial values of variable costs $c_{01} = 2$; $c_{02} = 1$.

Table 1

Numerical results of the algorithm's			
Time interval, variable costs	For exact values $a_1 = 3$; $a_2 = 1$	For the restored values before the adjustment $a_1 = 2.625$; $a_2 = 1.961$	For the restored values after the adjustment $a_1 = 3.06$; $a_2 = 0.982$
[0; 1] $c_1 = 4.697$ $c_2 = 5.045$	F = 2.153 $S_1 = 0$ $S_2 = 1$	F = 3.043 $S_1 = 0.236$ $S_2 = 0.764$	F = 2.136 $S_1 = 0$ $S_2 = 1$
[0; 2] $c_1 = 11.976$ $c_2 = 15.964$	F = 6.909 $S_1 = 0.246$ $S_2 = 0.754$	F = 7.892 $S_1 = 0.446$ $S_2 = 0.554$	F = 6.912 $S_1 = 0.231$ $S_2 = 0.769$
[0; 3] $c_1 = 29.787$ $c_2 = 42.681$	F = 15.699 $S_1 = 0.441$ $S_2 = 0.558$	F = 16.639 $S_1 = 0.53$ $S_2 = 0.47$	F = 15.749 $S_1 = 0.434$ $S_2 = 0.566$

Originality and practical value

The scientific novelty of the presented work lies, in particular, in the formulation and formalization of a new dynamic optimal set partitioning problem under uncertainty, the development of a solution algorithm, the design of a numerical experiment, and the analysis of the obtained numerical and analytical results. The results obtained in this study can be applied to solve a wide range of practical placement and partitioning problems in a more refined and adequate formulation for applied needs, particularly in logistics, transportation, and the partitioning of large community territories into administrative service centers.

Conclusions

The study is devoted to the software implementation of the dynamic problem of optimal set partitioning with fixed centers under uncertainty. A detailed review of existing approaches is provided, highlighting the specific features of dynamic formulations of optimal set partitioning problems, particularly under uncertainty, and emphasizing their key advantages over classical formulations. A numerical experiment was conducted, allowing visual assessment and comparison between crisp and fuzzy partitioning before and after the tuning of fuzzy parameters. A comparative analysis was performed to provide practical justification.

The graphs presented in the study were obtained using software developed by the authors in Python, based on various values of the model's input parameters, some of which were derived from solving system (3). The results confirmed the adequacy of the proposed model, and the outcomes of the numerical experiment allow for a visual evaluation of the model's validity. Based on these results, it can be concluded that the dynamic and fuzzy formulation of the optimal partitioning problem significantly enhances the adequacy of the mathematical model and makes it more adaptable for practical applications.

Time-varying system parameters have a significantly negative impact on the accuracy of robust models, but their inclusion in the problem formulation helps mitigate this influence. Further research may focus on more complex formulations of dynamic optimal partitioning problems under uncertainty, particularly in cases involving the placement of subset centers and constraints on network capacity.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Яковлев С. В., Кісельова О. М., Гарт Л. Л., Кузенков О. О., Закутній Д. В. Про динамічну задачу оптимального розбиття множин з фіксованими центрами. *Сучасні проблеми моделювання*. 2025. № 28. С. 190–203. DOI: <https://doi.org/10.33842/2313-125x-2025-30-190-203>
2. Adufu T., Kim Y. Dyna-P: Placement-aware Dynamic Partitioning for Lightweight Applications with Modern GPUs. *Research Square*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5774593/v1>
3. Barzegary E., Yoganasimhan H. A Recursive Partitioning Approach for Dynamic Discrete Choice Modeling in High-Dimensional Settings. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/pdf/2208.01476>
4. Bender M. A., Farach-Colton M., Goodrich M. T., Komlós H. History-Independent Dynamic Partitioning: Operation-Order Privacy. *ACM Transactions on Privacy and Security*. 2024. Vol. 2, Iss. 2. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1145/3651609>

5. Bulat A., Kiseleva E., Yakovlev S., Prytomanova O., Lebediev D. Solving the Problem of Fuzzy Partition-Distribution with Determination of the Location of Subset Centers. *Computation*. 2024. Vol. 12, Iss. 10. P. 199. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation12100199>
6. Cheramin M., Chen R. L.-Y., Cheng J., Pinar A. Data-driven robust optimization using scenario-induced uncertainty sets. *arXiv*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04977>
7. Hocking T. D., Srivastava A. Labeled Optimal Partitioning. *arXiv*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.13967>
8. Kiseleva E. M., Prytomanova O. M., Hart L. Solving a Two-stage Continuous-discrete Problem of Optimal Partitioning-Allocation with Subsets Centers Placement. *Open Computer Science*. 2020. Vol. 10, Iss. 1. P. 124–136. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0142>
9. Kuzenkov O., Kostenko O. Software development for solving the dynamic problem of optimal set partitioning with determination of the coordinates of their centers. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. 2024. № 28. С. 306–317. DOI: <https://doi.org/10.15421/432429>
10. Kuzenkov O., Lozovskyi A. Software development for solving the dynamic problem of optimal set partitioning with fixed centers. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. 2023. № 27. С. 212–220. DOI: <https://doi.org/10.15421/432320>
11. Lu J., Zhou T., Osorio C. Adaptive partitioning strategy for high-dimensional discrete simulation-based optimization problems. *arXiv*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.14119>
12. Moresco M., Mailhot M., Pesenti S. M. Uncertainty propagation and dynamic robust risk measures. *Mathematics of Operations Research*. 2024. Vol. 50, Iss. 3. P. 1939–1964. DOI: <https://doi.org/10.1287/moor.2023.0267>
13. Sudoso A., Aloise D. A Column Generation Algorithm with Dynamic Constraint Aggregation for Minimum Sum-of-Squares Clustering. *INFORMS Journal on Computing*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1287/ijoc.2024.0938>
14. Yu K., Zhang W. Dynamic data partitioning strategy for distributed learning on heterogeneous edge system. *Computer Communications*. 2025. Vol. 241. 108262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2025.108262>
15. Yu X., Zhai H., Tian R., Guan Y., Polat K., Alhudhaif A. Dynamic trajectory partition optimization method based on historical trajectory data. *Applied Soft Computing*. 2024. Vol. 151. 111120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111120>
16. Zvara Z., Szabó P. G. N., Lóránt B. B., Benczúr A. A. System-aware dynamic partitioning for batch and streaming workloads. *Proceedings of the 14th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing*. 2021. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1145/3468737.3494087>

О. М. КИСЕЛЬОВА^{1*}, О. М. ПРИТОМАНОВА^{2*}, О. О. КУЗЕНКОВ^{3*}

^{1*}Фак. прикладної математики та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта kiseleva47@ukr.net, ORCID 0000-0003-4303-1707

^{2*}Каф. штучного інтелекту, моделювання та статистики, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана, Інститут інформаційних технологій в економіці, пр. Берестецький 54/1, Київ, Україна, 03057, тел. +38 (044) 456 25 93, ел. пошта prytomanova.olga@kneu.edu.ua, ORCID 0000-0003-1878-6120

^{3*}Каф. обчислювальної математики та математичної кібернетики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта kuzenkov1986@gmail.com, ORCID 0000-0002-6378-7993

Програмна реалізація алгоритму розв’язання динамічної задачі оптимального розбиття множин в умовах невизначеності

Мета. Серед різних формулювань задачі оптимального розбиття множини (OSP) особливий інтерес представляють динамічні варіанти, в яких умови оптимізації змінюються з часом, через їхню актуальність для реальних застосувань. Такі системи часто працюють в умовах невизначеності, яка може виникати через неточні або неповні вхідні дані, нечіткі параметри або ненадійні математичні представлення поведінки системи. У цьому дослідженні розробляється комплексна математична та обчислювальна основа для вирішення динамічних задач OSP в умовах невизначеності. Метою дослідження є розробка програмного забезпечення

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

для вирішення нової динамічної задачі оптимального розбиття множин в умовах невизначеності, зокрема, включаючи формулювання чисельного експерименту, прикладну інтерпретацію отриманих результатів та порівняльний аналіз результатів чисельного експерименту з аналітичними результатами дослідження моделі. **Методика.** Методологічна основа дослідження складається з принципів теорії оптимального розбиття множин та теорії нечітких множин. Для вирішення систем звичайних диференціальних рівнянь, необхідних для визначення параметрів динамічної моделі, були використані сучасні чисельні методи. **Результати.** Формулювання динамічних задач оптимального розбиття множин в умовах невизначеності дозволяє включати нечіткі параметри моделі та отримувати результати навіть за наявності неповної інформації про систему. У роботі представлено чітко визначений алгоритм вирішення задачі, що визначається її математичним формулюванням. **Наукова новизна.** Запропоновані моделі є значним внеском у розвиток математичного моделювання, зокрема в динамічних та нечітких формулюваннях задач. Представлено методи та алгоритми розв'язання формалізованих задач, а результати порівняльного аналізу дозволяють оцінити аналітичні та чисельні переваги обох моделей та динамічного підходу до розв'язання таких задач. **Практична значимість.** Практична значимість отриманих у цій роботі результатів полягає у формулюванні нової динамічної задачі оптимального розбиття множини в умовах невизначеності, розробці програмного забезпечення для чисельної реалізації експерименту та візуалізації отриманих результатів. Формалізована математична модель та розроблене програмне забезпечення можуть бути застосовані до широкого кола практичних задач, таких як логістика, розміщення об'єктів, розбиття громад на адміністративні центри обслуговування та інші.

Ключові слова: динамічна задача; теорія оптимального розбиття множин; нечіткий параметр; нейро-нечіткі технології; нескінченновимірне математичне програмування; недиференційована оптимізація; методи штучного інтелекту

REFERENCES

1. Yakovlev, S., Kiseleva, E., Hart, L., Kuzenkov, O., & Zakutnii, D. (2025). On the dynamic problem of optimal set partitioning with fixed centers. *Modern Problems of Modeling*, 28, 190-203. DOI: <https://doi.org/10.33842/2313-125x-2025-30-190-203> (in Ukrainian)
2. Adufu, T., & Kim, Y. (2025). Dyna-P: Placement-aware Dynamic Partitioning for Lightweight Applications with Modern GPUs. *Research Square*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5774593/v1> (in English)
3. Barzegary, E., & Yoganarasimhan, H. (2025). A Recursive Partitioning Approach for Dynamic Discrete Choice Modeling in High-Dimensional Settings. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2208.01476> (in English)
4. Bender, M. A., Farach-Colton, M., Goodrich, M. T., & Komlós, H. (2024). History-Independent Dynamic Partitioning: Operation-Order Privacy. *ACM Transactions on Privacy and Security*, 2(2), 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1145/3651609> (in English)
5. Bulat, A., Kiseleva, E., Yakovlev, S., Prytomanova, O., & Lebediev, D. (2024). Solving the Problem of Fuzzy Partition-Distribution with Determination of the Location of Subset Centers. *Computation*, 12(10), 199. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation12100199> (in English)
6. Cheramin, M., Chen, R. L.-Y., Cheng, J., & Pinar, A. (2021). Data-driven robust optimization using scenario-induced uncertainty sets. *CoRR*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04977> (in English)
7. Hocking, T. D., & Srivastava, A. (2020). Labeled Optimal Partitioning. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.13967> (in English)
8. Kiseleva, E. M., Prytomanova, O. M., & Hart, L. (2020). Solving a Two-stage Continuous-discrete Problem of Optimal Partitioning-Allocation with Subsets Centers Placement. *Open Computer Science*, 10(1), 124-136. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0142> (in English)
9. Kuzenkov, O., & Kostenko, O. (2024). Software development for solving the dynamic problem of optimal set partitioning with determination of the coordinates of their centers. *Actual Problems of Automation and Information Technology*, 28, 306-317. DOI: <https://doi.org/10.15421/432429> (in English)
10. Kuzenkov, O., & Lozovskyi, A. (2023). Software development for solving the dynamic problem of optimal set partitioning with fixed centers. *Actual Problems of Automation and Information Technology*, 27, 212-220. DOI: <https://doi.org/10.15421/432320> (in English)
11. Lu, J., Zhou, T., & Osorio, C. (2021). Adaptive partitioning strategy for high-dimensional discrete simulation-based optimization problems. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.14119> (in English)
12. Moresco, M., Mailhot, M., & Pesenti, S. M. (2024). Uncertainty propagation and dynamic robust risk measures. *Mathematics of Operations Research*, 50(3), 1939-1964. DOI: <https://doi.org/10.1287/moor.2023.0267> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

13. Sudoso, A., & Aloise, D. (2025). A Column Generation Algorithm with Dynamic Constraint Aggregation for Minimum Sum-of-Squares Clustering. *INFORMS Journal on Computing*. DOI: <https://doi.org/10.1287/ijoc.2024.0938> (in English)
14. Yu, K., & Zhang, W. (2025). Dynamic data partitioning strategy for distributed learning on heterogeneous edge system. *Computer Communications*, 241, 108262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2025.108262> (in English)
15. Yu, X., Zhai, H., Tian, R., Guan, Y., Polat, K., & Alhudhaif, A. (2024). Dynamic trajectory partition optimization method based on historical trajectory data. *Applied Soft Computing*, 151, 111120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111120> (in English)
16. Zvara, Z., Szabó, P. G. N., Lóránt, B. B., & Benczúr, A. A. (2021). System-aware dynamic partitioning for batch and streaming workloads. *Proceedings of the 14th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing*, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1145/3468737.3494087> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.05.2025

Прийнята до друку: 24.09.2025

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669.14.018.8:[620.178:539.4]

I. O. VAKULENKO¹, S. O. PLITCHENKO^{2*}, K. Yu. SHEVELIEVA³

¹Dep. «Condensed Matter Physics», Dniprovsky State Technical University, Dnirobudivs'ka St., 2, Kamianske, Ukraine, 51900, tel. +38 (097) 437 72 21, e-mail vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

^{2*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Ukrainian State University Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

³Dep. «Condensed Matter Physics», Dniprovsky State Technical University, Dnirobudivs'ka St., 2, Kamianske, Ukraine, 51900, tel. +38 (067) 147 27 29, e-mail katerin.120201@gmail.com, ORCID 0009-0000-7201-4426

The Effect of Stress Pulses on the Limited Endurance Under Cyclic Loading of Thermal-Hardened Carbon Steel

Purpose. The assess effect of stress pulses on the cyclic endurance of thermal-hardened carbon steel. **Methodology.** A sheet with a thickness of 1 mm was selected for the study, made of steel with 0.42% C after thermal hardening. The treatment consisted of quenching and tempering at 300 °C. The samples were subjected to cyclic loading on the Saturn-10 machine, under a symmetrical cycle of alternating bending, with a frequency of 100 min⁻¹. Treatment with pulses of stress was carried out under conditions of «Iskra–23». To determine the effect pulses of stress on the cyclic endurance, samples after 50–60% by limit of endurance were subjected to doing pulses of stress. After completion treatment pulse of stress, the samples continued to be cyclically loaded until the moment of failure. The density of dislocations was measured by method of X-ray structural analysis on a DRON-3 diffractometer, by interferences (110), (211), (321). The complex of properties after thermal strengthening was determined under static tension, at a strain rate of 10⁻³ s⁻¹. **Findings.** After processing with pulses of stress studied, thermally hardened steel with a hardness of 46–47 HRC, an increase in hardness by 11 % was obtained. According to the analysis of the cyclic loading curves of thermally hardened carbon steel, it was determined that due to the action pulses of stress, an increase in limit of endurance occurs in a wide range of cyclic overload. Structural studies have determined that, in proportion to decrease at magnitude of cyclic overload, an increase limit of endurance corresponds to higher number accumulated dislocations by different slip systems. **Originality.** The increase at density of dislocations from the action pulses of stress is due to the development processes of partial unlocking of dislocations after thermal strengthening and activation systems of sliding, which are not characteristic of these loading conditions of the steels. As a result of the action pulses of stress, the propagation deformation per cycle occurs at lower amplitudes of load, due to formation of an additional number of dislocations. According to analysis lines of French, it was determined that participation of an increased number of dislocations at propagation of deformation per cycle shifts a moment transformation of reversible damages into irreversible ones, towards an increase at number of cycles. **Practical value.** The obtained research results can be useful for assessing by influence of an external source of stress on the behavior of a carbon steel product under cyclic loading.

Keywords: carbon steel; dislocation; cycle amplitude; stress pulse; cyclic endurance

Introduction

Under cyclic loading, the proportion of mobile dislocations at structure and their redistribution are among the many factors that determine limited endurance of a metallic material [25]. The application of influences such as the introduction of additional harmonics into the load cycle formation scheme, the action of electric current pulses [12], or surface

stresses of various origins [15, 23, 26] are capable varying degrees influence on structural transformations under cyclic loading. Compared with simple static loading schemes, the nature of plastic deformation metals and alloys under the action of a high-power stress pulse has significant differences [5, 19, 21]. Against the background various changes in the internal structure [26], the features

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

of origin and propagation plastic deformation [25] deserve attention. In proportion to increase at power acting mechanical pulse, the stresses are able to reach the levels of theoretical strength of the metal material, by absence signs of plastic deformation. This is due to the short duration of pulse, on the order of 10^{-6} to 10^{-9} seconds [17], the duration of which is not enough to begin of development relaxation processes of the arising stresses.

At same time, under action of the stress pulse, one should expect qualitative differences at nature of the nucleation and movement of dislocations, which will contribute to the emergence of high localization of plastic deformation and anomalous nature of changes at complex properties of the metallic material [2, 4, 11]. Moreover, depending at power a pulse of the applied stress, one can observe a qualitatively different nature impact on the complex of properties [3, 7, 14]. Indeed, experimental studies [25] have determined that in proportion to the increase at power of the pulse, the strengthening effect of the metallic material will increase. However, in appearance, the nature of the change at strengthening effect most likely resembles an extreme dependence [6, 13].

Based on this, the value of pulse power, when the hardening effect changes to softening, is a completely expected phenomenon and is called the critical value [25]. Thus, in accordance with a nature of the metal material, the hardening technology and the structural state [6, 10, 13, 18], depending on the power of stress pulse, it is quite reasonable to obtain a qualitatively different effect of the impact: from hardening to softening [27–29].

Purpose

The assess effect of stress pulses on the cyclic endurance of thermal-hardened carbon steel.

Methodology

To study influence of the surface stress pulse on the behavior under cyclic loading, a sheet 1 mm thick, made of ordinary quality steel with a carbon concentration of 0.42%, was selected. Considering the fairly wide application technology thermal hardening of products at machine-building industry, the structural state of the steel after thermal hardening was selected for the research. The treatment consist-

ed of heating to temperatures higher than A_{c3} , quenching in oil and tempering at 300 °C for 1 hour.

Flat-shaped samples, with a special fillet, with a structure after thermal hardening were subjected to cyclic loading under conditions at Saturn-10 testing machine. The choice of the machine is due to the possibility of simultaneous loading of up to 10 samples, with different cycle amplitudes, which significantly reduces the time for obtaining test results for the construction of the cyclic loading curve. The loading scheme of the sample corresponded to a symmetrical cycle of alternating bending, at a loading frequency of 100 min^{-1} , at room temperature of the tests.

The construction and analysis of the cyclic loading curve were carried out for sections of limited endurance [8, 16, 17]. The boundary between at formation of reversed and non-reversed damages was determined by the methods [8]. The surface stress pulse treatment of the samples was carried out on the «Iskra–23» bath-type equipment. The stress pulses order of 1–2 GPa arose from an electric discharge in water, at voltage of 15–18 kV. The pulse energy was 10–12 kJ.

The treatment was completed after reaching approximately 15 thousand pulses, at a frequency of 2–3 Hz [24]. To determine effect stress pulses on cyclic endurance, the samples were subjected to stress pulses after 50–60% of the limited endurance. After the pulse treatment, the samples continued to be cyclically loaded until the moment of failure.

The effect assessment consisted of a comparative analysis limited endurance of the steel after thermal hardening and after treatment with stress pulses, until the moment of final failure.

To identify microstructure, the metal was etched in a standard etchant (4% HNO_3 solution in ethanol). The elements of the microstructure were studied using light and electron microscopy [1].

The dislocation density was measured by the method of X-ray structural analysis [9], on a DRON–3 diffractometer, by interferences (110), (211), (321).

The complex of properties after thermal hardening was determined under static tension, at a strain rate of 10^{-3} s^{-1} . As a characteristic at strength of the steel, after the action of stress pulses, the Rockwell hardness was chosen [20].

Findings

According structural analysis of the studied steel, after quenching was formed a structure of lath martensite with a lath width of the order of $1\ \mu$, with a certain density of dislocations (Fig. 1, *a*).

a



b



Fig. 1. Structure of steel after quenching (*a*) and tempering at a temperature of 300 °C (*b*). Magnification is 18000

In the martensite crystals, appearance of thin layers at form of twins is observed. When larger face of the martensite lath coincides with the foil plane, presence of randomly oriented, dispersed particles of cementite with shape of intermittent lines is determined. Heating the steel to 300 °C after quenching, contributes to the additional release of carbide particles on groups of dislocation in the volume of the martensite laths (Fig. 1, *b*).

The existence a section of the structure with partial loss of contrast is evidence of the development dislocation recombination processes. As a result, against the background of a decrease at number of dislocations, there is an increase at heterogeneity of their location in martensite crystals (Fig. 1, *b*).

The appearance of carbide phase particles in wide walls of dislocations indicates the almost complete absence of mobile dislocations in the steel after tempering. This is confirmed by the hardness (46–47 HRC) and the qualitative coincidence complex of the properties with known results [22, 25]. After treatment pulses of the stress thermal hardened steel with a hardness of 46–47 HRC, an increase at hardness by 11% was obtained. Based on this, according to obtained effect influence on hardness, the used stress pulse power is less than the critical value.

The influence of treatment pulses of the stress on the cyclic loading curves is shown in Fig. 2, *a*.

First, regardless of the structural state at steel (thermal hardened or treatment of stress pulse), the shape of curves remained practically unchanged. In general, for the studied range σ_a , pulse treatment leads to a shift of the curve to region of higher cycle amplitudes. At same time, the difference at values of limited endurance (for convenience, will to denote N_i – limited endurance after thermal strengthening and after action of stress pulses – N_i') indicates by existence of a qualitative dependence on the degree of cyclic overload (K), which is equal to the ratio $\sigma_a/\sigma_{\cdot 1}$, where $\sigma_{\cdot 1}$ is the maximum amplitude of the cycle under conditions of unlimited endurance.

Thus, for small K (regions $B'C'$ and BC , Fig. 2, *a*) for the same σ_a , treatment with stress pulses leads to a significant increase in limited endurance: $N_i' > N_i$.

For example, for $\sigma_a \sim 550$ MPa ($\lg \sigma_a = 2,74$), $N_i \sim 3,6 \cdot 10^5$ c, while $N_i' \sim 1,3 \cdot 10^6$ c (Fig. 2, *a*). As degree of cyclic overload increases, difference between N_i' and N_i (ΔN) gradually decreases. This is due to an acceleration of the transition from one section to another (i.e. B' and B), and the difference at angular coefficients for sections $A'B'$ and AB .

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

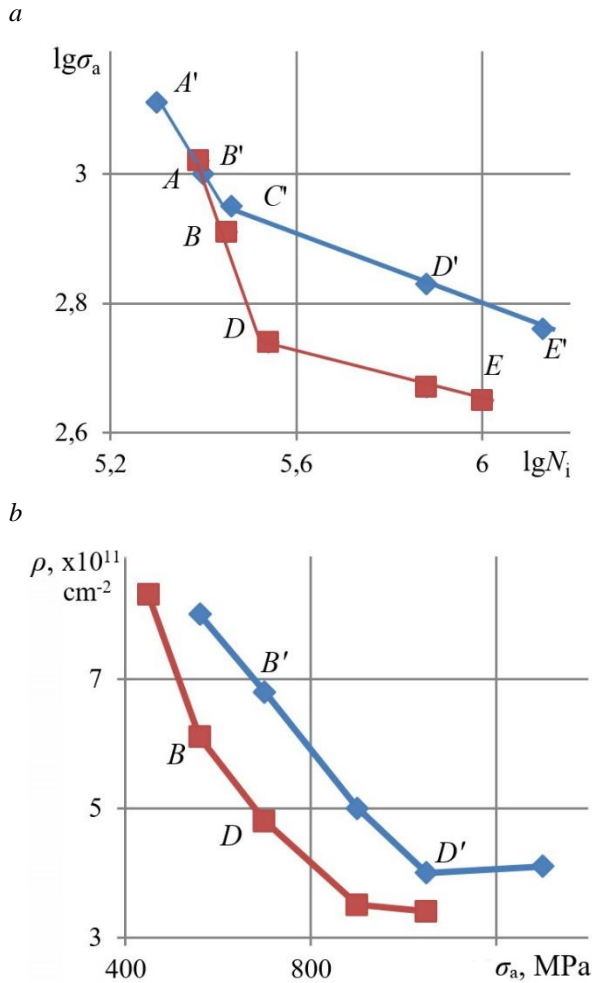


Fig. 2. Logarithmic curves cyclic loading of the carbon steel (a) and change in total dislocation density by three interferences (b) after thermal hardening (■) and stress pulse treatment (◆)

As a result, with the same cycle amplitude (i.e. A), the condition will be achieved when $N_i' \approx N_i \approx 2.5 \cdot 10^5$ c. At same time, extrapolation of the section AB of curve into the region of increasing σ_a indicates achievement of conditions when $N_i' < N_i$ will be. Thus, the treatment of thermally hardened steel with pulses of stress has a qualitatively different nature impact on the cyclic endurance depending degree of cyclic overload.

Starting from the region of large amplitudes, where effect pulses of the stress is minimal or absent altogether (i.e. A), moving along the dependence $\sigma_a \sim f(N_i)$ towards increasing N_i is accompanied by a corresponding increase at cyclic endurance of the metal.

To determine the nature influence pulses of the stress on the cyclic endurance, change of concentration defects in the crystalline structure of steel was assessed. Considering that dislocation represents an elementary carrier of plastic deformation, the measurement of their number (ρ_{hkl}) was carried out for three crystallographic slip systems. This is due to the fact that action of the emerging stress pulse of different power is capable of local temperature increase [17], then the activation of different dislocation slip systems should be a completely expected phenomenon. Thus, for steels with a bcc crystal lattice, for the temperature range from low temperatures to +180 °C, the movement of dislocations occurs predominantly by the crystallographic planes {211}.

For temperatures of 200–630 °C, the {110} systems are activated to a greater extent, and above 1170 °C – {321} [25].

According to a formal assessment, in the form of a scalar sum over three dislocation slip systems, it was determined that action of stress pulses contributes to an increase at concentration of dislocations to ensure an increase at limited endurance of cyclic loading (Fig. 2, b).

The given dependence of the limited endurance on σ_a should actually be determined by the ratio between volumes of metal in the plane deformed and volumetric stressed state. The given ratio, in turn, determines the magnitude of the deformation per cycle and the number of dislocations that provide it. To estimate the deformation per cycle, the Coffin-Manson equation was used [8, 16]:

$$\varepsilon_i \cdot (N_i)^a = b, \quad (1)$$

where ε_i is the deformation per load of the cycle, N_i is the limited endurance, a and b are constants, for carbon steels they are 0.5 and 1, respectively [25].

After substituting the values of a and b into (1) and performing transformations, ε_i is determined by:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{(N_i)^{0.5}}. \quad (2)$$

After substituting in (2) for the same σ_a corresponding values of N_i , it was found that the deformation per cycle decreased by approximately 20% after the action of stress pulses.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

To determine the increase in cyclic endurance, the slope a line of the French (k) was estimated. According to the scheme shown in Fig. 3, *a*, for the region limited endurance of steel, k is determined by the ratio:

$$k = -tg\gamma = -\left[\frac{\alpha}{(N_i^D - N_i^F)} \right]. \quad (3)$$

where γ is a slope a line of the French, α is a constant characteristic, N_i^D and N_i^F are the number of cycles to failure of the samples for the corresponding load amplitudes (points *D*, *F* respectively).

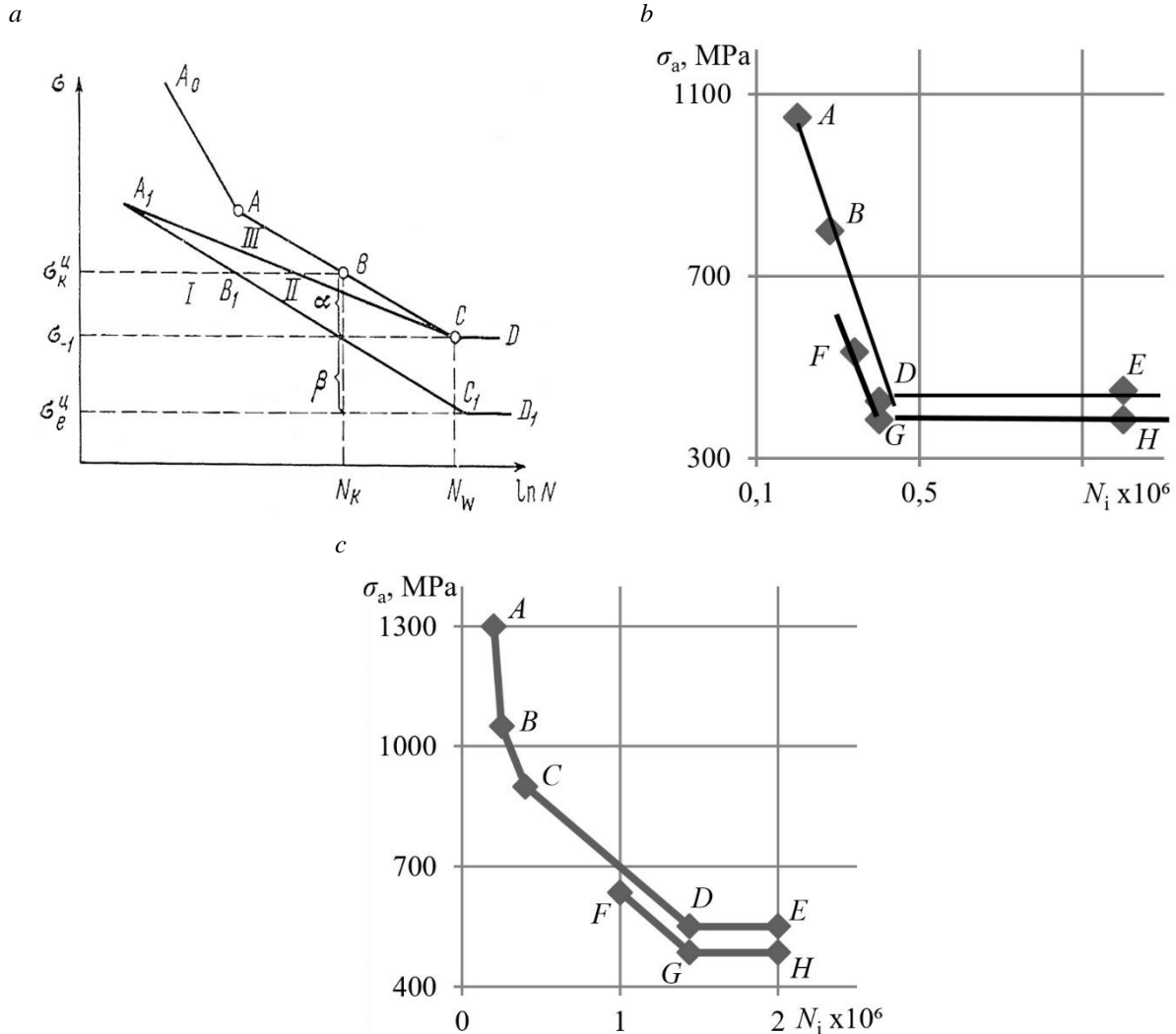


Fig. 3. Methodology for determining the angle of inclination line of the French (lines: the fracture A_0 , A , B , C , D ; formation of the sub microcracks A_1 , B_1 , C_1 , D_1 and microcracks A_1 , C , D) (*a*) and corresponding application of the method for analyzing cyclic loading curves after thermal strengthening (*b*) and the action of stress pulses (*c*)

After substituting in (3) $\alpha = 85 \text{ MPa}$ for both thermally hardened steel (Fig. 3, *b*) and after treatment with stress pulses (Fig. 3, *c*), the corresponding values of k were determined.

It was determined that after action of the stress pulses $k = 1.24 \cdot 10^{-4} \text{ MPa/c}$, and after thermal hardening $2.8 \cdot 10^{-3} \text{ MPa/c}$.

The formally, according to (3), k is a measure decrease at cycle amplitude to ensure an increase at

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

limited endurance by one cycle. On other hand, a line of the French (A_1C , Fig. 3, *a*) is the boundary separating areas formation are reversible damages (submicrocracks) from non-reversible (microcracks).

Indeed, according to the given scheme (Fig. 3, *a*), for a certain cycle amplitude (σ_{κ}^H), in the region (*I*) up to a number cycles of loading a point of B_1 , there are no metal damages. If the number of cycles exceeds the value B_1 , conditions for the formation of submicrocracks are created (area *II* of the diagram).

Given the very small size of submicrocracks and the insufficient intensity of stresses in it a mouth, their growth is significantly inhibited. The specified conditions for the existence of sub microcracks are called often the incubation period of growth. With further accumulation of loading cycles (more than point B_1), a gradual increase in their length occurs in accordance with the increase at intensity of stresses at its mouth.

Further, at the moment of crossing a line of the French, the size of damage and the corresponding intensity of stresses will contribute to an increase at rate of growth of the metal damage. There is a transition from the incubation period to growth at a constant growth rate (region *III*).

Crossing the ABC line is accompanied by further changes in the kinetics of damage growth: from growth at a constant rate to accelerated. Depending on the accumulated number of cycles, the accelerated growth of the microcracks very quickly passes into an uncontrolled stage, with subsequent final destruction. Under such circumstances, a smaller k the higher limit endurance of the metallic material should be expected. In order to confirm influence action pulses of the stress on the endurance under cyclic loading, let us estimate change at dislocation density (A), which a necessary to maintain conditions of the continuous deformation propagation during the loading cycle:

$$A = \frac{\Delta\rho}{\Delta N_i}, \quad (4)$$

where $\Delta\rho$ is the change at number of dislocations according to the change at number of cycles N_i .

For points B and D of cyclic loading curve, for steel after thermal hardening (Fig. 2, *b*) $\Delta\rho = \rho_B - \rho_D$, A_1 by (4) will be equal to $4.8 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}/\text{c}$.

Similarly, A_2 was determined (after stress pulse treatment), which was $2.7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}/\text{c}$. The excess of A_2 over A_1 is approximately an order of magnitude. Thus, formation of an additional density of the mobile dislocations should be considered as promoting propagation of deformation at a reduced amplitude of the loading cycle.

Thus, for carbon steel with a structure after thermal hardening, the formation of an additional number of mobile dislocations due to pulses of the stress may be based on the unlocking of dislocations formed at thermal hardening, or due to the activation of other slip systems not characteristic of these cyclic loading conditions.

Originality and practical value

Experimental studies have determined that the action of stress pulses from an external source contributes to an increase at limited endurance of carbon steel under cyclic loading. The used analysis crystallographic systems of dislocation slip showed that simultaneously with the increase in limited endurance, there is an increase at accumulated density of dislocations in different crystallographic systems of the slip.

The kinetics of the change at density of dislocations depending on the degree of cyclic overload indicates the existence of different mechanisms of dislocation growth under the action of stress pulses. In general, the obtained effect can be associated with the development of two qualitatively different mechanisms. The first is the partial unlocking of dislocations formed due to the formation of tempering martensite crystals. According to this mechanism, the detachment of dislocations from the attachment sites changes number of mobile dislocations in the $\{110\}$ and $\{211\}$ slip systems. The second mechanism is the activation of the $\{321\}$ slip systems, which is not characteristic of these loading conditions.

A combined analysis nature of change at dislocation density by different slip systems from the magnitude of limited endurance found of existence influence degree of cyclic overload of the metal. Indeed, for same stresses of the cycle amplitude, effectiveness of the stress pulse action shifts towards decrease cyclic overload degree. This is due to fact that action of stress pulses, due to the formation of an additional number of dislocations,

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

contributes to the propagation of deformation per cycle at lower load amplitudes.

An additional confirmation of the above position is the analysis curves of French. According results obtained, it was determined that participation of an increased number of dislocations at propagation of deformation per cycle shifts the moment transformation of reversible damage into irreversible damage towards an increase in the accumulated number of cycles.

Effect of changing number accumulated of dislocations from the action of an external source of stress pulses has practical significance for assessing the service life of products made of heat-hardened steels under cyclic loading. With an increase at degree of cyclic overload, the effect of pulse from an external stress source decreases. The result presented has practical significance, especially under conditions appearance of the unpredictable additional, cyclically varying stresses during operation of the products.

Conclusions

1. Analysis of the cyclic loading curves of thermal hardened carbon steel has determined that due to the action pulses of stress, the value of lim-

ited endurance increases in a wide range of cyclic overload.

2. Structural studies have determined that, in proportion to the decrease at magnitude of cyclic overload, increase in limited endurance corresponds to a higher number of accumulated dislocations by to different sliding systems.

3. The increase at density of dislocations from the action pulses of stress is due to development processes of unlocking of dislocations formed after thermal strengthening and activation of slip systems not characteristic of steels at that conditions.

4. As a result, action pulses of stress, the propagation of deformation per cycle occurs at lower load amplitudes, due to the formation of an additional number of dislocations.

5. Analysis by lines of the French, it was determined that participation of an addition number of dislocations at propagation of deformation per cycle shifts a moment of transformation of submicrocracks (the damage is reversible) into microcracks (the damage is irreversible) ones, towards an increase at number of cycles.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вакуленко І. О. *Структурний аналіз в матеріалознавстві* : навч. посіб. Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький, 2010. 124 с. ISBN 978-966-1507-52-3.
2. Askerov Kh. A., Vakulenko I. O. Evaluation of the influence of dispersion of pearlite on the fatigue of carbon steel. *Materials Science*. 2020. Vol. 56. P. 214–217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00418-w>
3. Bhamu R. K., Shukla A., Sharma S. C., Harsha S. P. Vibration response of steam turbine healthy and cracked blade under the stress stiffening and spin softening effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2022. Vol. 236, No. 2. P. 224–243. DOI: <https://doi.org/10.1177/14644193221078656>
4. Braut S., Tevčić M., Butković M., Božić Ž., Žigulić R. Application of modified Locati method in fatigue strength testing of a turbo compressor blade. *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 31. P. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.007>
5. Casalino G., Moradi M., Karami Moghadam M., Khorram A., Perulli P. Experimental and numerical study of AISI 4130 steel surface hardening by pulsed Nd:YAG laser. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 19. Art. 3136. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193136>
6. Cheng Y., Wang Y., Lin J., Xu S., Zhang P. Research status of the influence of machining processes and surface modification technology on the surface integrity of bearing steel materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125. P. 2897–2923. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10960-x>
7. Cheng Z., Wang S., Wu G., Gao J., Yang X., Wu H. Tribological properties of high-entropy alloys: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 29. P. 389–403. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2373-4>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

8. D'Antuono P. An analytical relation between the Weibull and Basquin laws for smooth and notched specimens and application to constant amplitude fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2020. Vol. 43, No. 5. P. 991–1004. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.13175>
9. Jain A., Dhapekar N. K. Methods of sample preparation in X-ray diffractometer (XRD). *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education (IJARIE)*. 2022. Vol. 8, No. 3. P. 190–192. URL: http://ijarjie.com/AdminUploadPdf/METHODS_OF_SAMPLE_PREPARATION_IN_X_RAY_DIFFRACTOMETER_XRD_ijarjie16518.pdf?srsrltid=AfmBOOrNi8z3PCrKxW2PHBQI2I5IOsGgtlp-UqaAWOoTO9nmgEK0tCZH
10. John M., Ralls A. M., Dooley S. C., Vellooridathil Thazhathidathil A. K., Perka A. K., Kuruveri U. B., Menezes P. L. Ultrasonic surface rolling process: Properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 22. Art. 10986. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112210986>
11. Kafaei A., Salmani F., Lakzian E., Wróblewski W., Vlaskin M. S., Deng Q. The best angle of hot steam injection holes in the 3D steam turbine blade cascade. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022. Vol. 173. Art. 107387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107387>
12. Kim M.-J., Bui-Thi T.-A., Kang S.-G., Hong S.-T., Nam Han H. Electric current-induced phenomena in metallic materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2024. Vol. 32. Art. 101190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2024.101190>
13. Klumpp A., Ruf M., Dietrich S., Schulze V. Long crack propagation and closure in DC(T) specimens of Ni-based superalloy Inconel 718 and stainless steel AISI 301 after shot peening. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 269. Art. 108551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108551>
14. Krechkovska H., Hredil M., Student O., Svirska L., Krechkovska S., Tsybailo I., Solovei P. Peculiarities of fatigue fracture of high-alloyed heat-resistant steel after its operation in steam turbine rotor blades. *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 167, Part B. Art. 107341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107341>
15. Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N., Dzhemelinskyi V. V., Lamikiz A., Prokopenko G. I., Iefimov M. O., Grinkevych K. E. Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel. *Wear*. 2020. Vol. 462–463. Article 203494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203494>
16. Maierhofer J., Kolitsch S., Pippan R., Gänser H.-P., Madia M., Zerbst U. The cyclic R-curve – Determination, problems, limitations and application. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. Vol. 198. P. 45–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.09.032>
17. Murakami Y., Takagi T., Wada K., Matsunaga H. Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter. *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 146. Article 106138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106138>
18. Peng Y., Liu Z., Chen C., Gong J., Somers M. A. J. Effect of low-temperature surface hardening by carburization on the fatigue behavior of AISI 316L austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 769. Article 138524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138524>
19. Rivaz A., Mousavi Anijdan S. H., Moazami-Goudarzi M., Nazari Ghohroudi A., Jafarian H. R. Damage causes and failure analysis of a steam turbine blade made of martensitic stainless steel after 72,000h of working. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 131. Article 105801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105801>
20. *Rockwell hardness testing: ISO 6508, ASTM E18*. URL: <https://www.zwickroell.com>
21. Salleh M. N. M., Ishak M., Aiman M. H., Zaifuddin Q., Quazi M. M. The effect of laser surface hardening on the surface hardness of mild steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 5th International Conference on Mechanical Engineering Research 2019 (ICMER 2019)* (Kuantan, Malaysia, 30–31 July 2019). 2020. Vol. 788. Art. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012014>
22. Schönbauer B. M., Mayer H. Effect of small defects on the fatigue strength of martensitic stainless steels. *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 127. P. 362–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.021>
23. Švábenská E., Pizurová N., Roupcová P., Chlupová A., Brajer J., Foldyna J., Schneeweiss O. Effect of shock wave on microstructure of silicon steel. *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 20. Art. 100415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100415>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

24. Vakulenko I. A., Kurt B., Raksha S. V., Askerov H., Hryshchenko M. A. The effect of stress pulses on the cyclic endurance of steel axle wheel-set. *Materials of the International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia/Turkey (IMSMATEC'19)* (Nevsehir, Turkey, 21–23 June, 2019). Nevsehir Haci Bektas Veli University. Nevsehir, 2019. P. 355–359. URL: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/11676>
25. Vakulenko I. A., Vakulenko L., Dal S., Asgarov Kh., Bolotova D., Kurt B. *Structure evolution in steels of railway wheels at manufacture and operations* / ed. S. Dal. Ankara : Nobel Bilimsel Eserler, 2023. 270 p.
26. Wu J., Zhao J., Qiao H., Hu X., Yang Y. The new technologies developed from laser shock processing. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 6. Art. 1453. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13061453>
27. Yang F., Liu P., Zhou L., He W., Pan X., An Z. Review on anti-fatigue performance of gradient microstructures in metallic components by laser shock peening. *Metals*. 2023. Vol. 13, No. 5. Art. 979. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050979>
28. Yoshinaka F., Nakamura T., Takeuchi A., Uesugi M., Uesugi K. Initiation and growth behaviour of small internal fatigue cracks in Ti-6Al-4V via synchrotron radiation microcomputed tomography. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2019. Vol. 42, No. 9. P. 2093–2105. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.13085>
29. Zhou L., Zhao T., Yu Y., Liu P., Pan X. Effect of laser shock peening on high-cycle fatigue performance of 1Cr18Ni9Ti/GH1140 weld. *Metals*. 2022. Vol. 12, No. 9. Art. 1495. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12091495>

I. O. ВАКУЛЕНКО¹, С. О. ПЛІТЧЕНКО^{2*}, К. Ю. ШЕВЕЛЄВА³

¹Каф. «Фізика конденсованого стану», Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51900, тел. +38(097) 437 72 21, ел. пошта vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

^{2*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056) 373 15 18, ел. пошта plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

³Каф. «Фізика конденсованого стану», Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51900, тел. +38(067) 147 27 29, ел. пошта katerin.120201@gmail.com, ORCID 0009-0000-7201-4426

Вплив імпульсів напруження на обмежену витривалість при циклічному навантаженні термічно зміцненої вуглецевої сталі

Мета. Оцінити вплив імпульсів напруження на циклічну витривалість термічно зміцненої вуглецевої сталі. **Методика.** Для дослідження обраний лист товщиною 1 мм зі сталі з 0,42 % C після покращення. Обробка складалася з гартування та відпуску при 300 °С. Зразки піддавалися циклічному навантаженню на машині Сатурн-10 за симетричного циклу знакозмінного згину, з частотою 100 хв⁻¹. Обробку імпульсами напружень проводили за умов «Іскра–23». Для визначення дії імпульсів поверхневих напружень на циклічну витривалість зразки, після 50–60 % обмеженої витривалості, піддавалися дії імпульсів напруження. Після завершення імпульсної обробки, зразки продовжували циклічно навантажувати до моменту руйнування. Густина дислокацій вимірювали за методикою рентгенівського структурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3, за інтерференціями (110), (211), (321). Комплекс властивостей після термічного зміцнення визначали за статичного розтягу, при швидкості деформації 10⁻³ с⁻¹. **Результати.** Після обробки імпульсами напружень досліджуваної, термічно зміцненої сталі з твердістю 46–47 HRC, отримали підвищення твердості на 11 %. За аналізом кривих циклічного навантаження термічно зміцненої вуглецевої сталі визначено, що завдяки дії імпульсів напружень відбувається збільшення обмеженої витривалості в широкому діапазоні циклічного перевантаження. Структурними дослідженнями визначено, що пропорційно зниженню величини циклічного перевантаження, підвищенню обмеженої витривалості відповідає більш висока кількість накопичених дислокацій за різних систем ковзання. **Наукова новизна.** Збільшення густини дислокацій від дії імпульсів напружень, обумовлено розвитком процесів часткового розблокування дислокацій після термічного зміцнення та активації не характерних для сталей систем ковзання. В результаті дії імпульсу напружень, розповсюдження деформації за цикл відбувається при більш низьких амплітудах навантаження, завдяки утворенню додаткової кількості дислокацій. За аналізом ліній Френча визначено, що участь підвищеної кількості дислокацій в розповсюдженні деформації за цикл, зсуває момент перетворення обернених ушко-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

джерень в не обернені, в бік збільшення кількості циклів. **Практична значимість.** Отримані результати досліджень можуть бути корисними для оцінки впливу зовнішнього джерела напруження на поведінку виробу з вуглецевої сталі за циклічного навантаження.

Ключові слова: вуглецева сталь; дислокація; амплітуда циклу; імпульс напруження; циклічна витривалість

REFERENCES

1. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi: Navchalnyi posibnyk*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi Publishing. (in Ukrainian)
2. Askerov, Kh. A., & Vakulenko, I. O. (2020). Evaluation of the influence of dispersion of pearlite on the fatigue of carbon steel. *Materials Science*, 56, 214-217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00418-w> (in English)
3. Bhamu, R. K., Shukla, A., Sharma, S. C., & Harsha, S. P. (2022). Vibration response of steam turbine healthy and cracked blade under the stress stiffening and spin softening effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 236(2), 224-243. DOI: <https://doi.org/10.1177/14644193221078656> (in English)
4. Braut, S., Tevčić, M., Butković, M., Božić, Ž., & Žigulić, R. (2021). Application of modified Locati method in fatigue strength testing of a turbo compressor blade. *Procedia Structural Integrity*, 31, 33-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.007> (in English)
5. Casalino, G., Moradi, M., Karami Moghadam, M., Khorram, A., & Perulli, P. (2019). Experimental and numerical study of AISI 4130 steel surface hardening by pulsed Nd:YAG laser. *Materials*, 12(19), 3136. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193136> (in English)
6. Cheng, Y., Wang, Y., Lin, J., Xu, S., & Zhang, P. (2023). Research status of the influence of machining processes and surface modification technology on the surface integrity of bearing steel materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 2897-2923. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10960-x> (in English)
7. Cheng, Z., Wang, S., Wu, G., Gao, J., Yang, X., & Wu, H. (2022). Tribological properties of high-entropy alloys: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29, 389-403. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2373-4> (in English)
8. D'Antuono, P. (2020). An analytical relation between the Weibull and Basquin laws for smooth and notched specimens and application to constant amplitude fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(5), 991-1004. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.13175> (in English)
9. Jain, A., & Dhapekar, N. K. (2022). Methods of sample preparation in X-ray diffractometer (XRD). *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education (IJARIE)*, 8(3), 190-192. Retrieved from http://ijarjie.com/AdminUploadPdf/METHODS_OF_SAMPLE_PREPARATION_IN_X_RAY_DIFFRACTOMETER_XRD_ijarjie16518.pdf?srsId=AfmBOorNi8z3PCrKxW2PHBQI2I5IOsGgtlp-UqaAWOoTO9nmgEK0tCZH (in English)
10. John, M., Ralls, A. M., Dooley, S. C., Vellooridathil Thazhathidathil, A. K., Perka, A. K., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2021). Ultrasonic surface rolling process: Properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*, 11(22), 10986. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112210986> (in English)
11. Kafaei, A., Salmani, F., Lakzian, E., Wróblewski, W., Vlaskin, M. S., & Deng, Q. (2022). The best angle of hot steam injection holes in the 3D steam turbine blade cascade. *International Journal of Thermal Sciences*, 173, 107387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107387> (in English)
12. Kim, M.-J., Bui-Thi, T.-A., Kang, S.-G., Hong, S.-T., & Nam Han, H. (2024). Electric current-induced phenomena in metallic materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 32, 101190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2024.101190> (in English)
13. Klumpp, A., Ruf, M., Dietrich, S., & Schulze, V. (2022). Long crack propagation and closure in DC(T) specimens of Ni-based superalloy Inconel 718 and stainless steel AISI 301 after shot peening. *Engineering Fracture Mechanics*, 269, 108551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108551> (in English)
14. Krechkovska, H., Hredil, M., Student, O., Svirská, L., Krechkovska, S., Tsybailo, I., & Solovei, P. (2023). Peculiarities of fatigue fracture of high-alloyed heat-resistant steel after its operation in steam turbine rotor blades. *International Journal of Fatigue*, 167(Part B), 107341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107341> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

15. Lesyk, D. A., Martinez, S., Mordyuk, B. N., Dzhemelinskyi, V. V., Lamikiz, A., Prokopenko, G. I., Iefimov, M. O., & Grinkevych, K. E. (2020). Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel. *Wear*, 462-463, 203494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203494> (in English)
16. Maierhofer, J., Kolitsch, S., Pippan, R., Gänser, H.-P., Madia, M., & Zerbst, U. (2018). The cyclic R-curve – Determination, problems, limitations and application. *Engineering Fracture Mechanics*, 198, 45-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.09.032> (in English)
17. Murakami, Y., Takagi, T., Wada, K., & Matsunaga, H. (2021). Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter. *International Journal of Fatigue*, 146, 106138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106138> (in English)
18. Peng, Y., Liu, Z., Chen, C., Gong, J., & Somers, M. A. J. (2020). Effect of low-temperature surface hardening by carburization on the fatigue behavior of AISI 316L austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 769, 138524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138524> (in English)
19. Rivaz, A., Mousavi Anijdan, S. H., Moazami-Goudarzi, M., Nazari Ghohroudi, A., & Jafarian, H. R. (2021). Damage causes and failure analysis of a steam turbine blade made of martensitic stainless steel after 72 000 h of working. *Engineering Failure Analysis*, 131, 105801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105801> (in English)
20. ZwickRoell. (n.d.). *Rockwell hardness testing: ISO 6508, ASTM E18*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.zwickroell.com>
21. Salleh, M. N. M., Ishak, M., Aiman, M. H., Zaifuddin, Q., & Quazi, M. M. (2020). The effect of laser surface hardening on the surface hardness of mild steel. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788, 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012014> (in English)
22. Schönbauer, B. M., & Mayer, H. (2019). Effect of small defects on the fatigue strength of martensitic stainless steels. *International Journal of Fatigue*, 127, 362-375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.021>
23. Švábenská, E., Pizúrová, N., Roupcová, P., Chlupová, A., Brajer, J., Foldyna, J., & Schneeweiss, O. (2020). Effect of shock wave on microstructure of silicon steel. *Surfaces and Interfaces*, 20, 100415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100415> (in English)
24. Vakulenko, I. A., Kurt, B., Raksha, S. V., Askerov, H., & Hryshchenko, M. A. (2019, June 21-23). *The effect of stress pulses on the cyclic endurance of steel axle wheel-set*. In *Papers presented at the International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineering and Technology in Cappadocia/Turkey (IMSMATEC'19)* (pp. 355-359), Nevsehir Haci Bektas Veli University, Nevsehir, Turkey. Retrieved from <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/11676> (in English)
25. Vakulenko, I. A., Vakulenko, L., Dal, S., Asgarov, Kh., Bolotova, D., & Kurt, B. (2023). *Structure evolution in steels of railway wheels at manufacture and operations* (S. Dal, Ed.). Nobel Bilimsel Eserler. (in English)
26. Wu, J., Zhao, J., Qiao, H., Hu, X., & Yang, Y. (2020). The new technologies developed from laser shock processing. *Materials*, 13(6), 1453. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13061453> (in English)
27. Yang, F., Liu, P., Zhou, L., He, W., Pan, X., & An, Z. (2023). Review on anti-fatigue performance of gradient microstructures in metallic components by laser shock peening. *Metals*, 13(5), 979. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050979> (in English)
28. Yoshinaka, F., Nakamura, T., Takeuchi, A., Uesugi, M., & Uesugi, K. (2019). Initiation and growth behaviour of small internal fatigue cracks in Ti-6Al-4V via synchrotron radiation microcomputed tomography. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42(9), 2093-2105. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.13085> (in English)
29. Zhou, L., Zhao, T., Yu, Y., Liu, P., & Pan, X. (2022). Effect of laser shock peening on high-cycle fatigue performance of 1Cr18Ni9Ti/GH1140 weld. *Metals*, 12(9), 1495. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12091495> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.05.2025

Прийнята до друку: 19.09.2025

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.4.016.5:[004.94:621.318-047.37]

Є. М. ЧУПРИНА^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, О. І. БОНДАР^{3*}, С. В. ПЛАКСІН^{4*},
Д. В. УСТИМЕНКО^{5,6*}, О. О. ГОЛОТА^{7*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 360 37 88, ел. пошта nesty.lords@gmail.com, ORCID 0000-0002-0986-1283

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 333 88 96, ел. пошта etemdiit@gmail.com, ORCID 0000-0003-3884-5589

^{4*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{5*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{6*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{7*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту

Мета. Основна ідея роботи полягає в експериментальному дослідженні динамічних показників шляхових котушок натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту з подальшим порівнянням їх характеристик для обґрунтованого вибору раціональної котушки за такими критеріями як: час наростання струму та сили тяги. **Методика.** Дослідження були виконані експериментальним шляхом. Спеціально для цих потреб було розроблено стенд для визначення динамічних показників шляхових котушок. До основних динамічних показників відносимо: час наростання струму у котушці, до допоміжних: силу тяги та температурні режими. Вимірювання часових характеристик, зокрема наростання струму, здійснювались за допомогою осцилографа, сила тяги визначалася методом поступового навантаження платформи встановленої на левітуючому магніті немагнітним вантажем. Температурні режими були зафіксовані за допомогою тепловізора. Під час роботи було досліджено чотири типи котушок, які відрізняються між собою такими показниками як: діаметр дроту, кількістю витків, електричним опором та індуктивністю. Для кожної з котушок проводились серії вимірювань з урахуванням зміни шпаруватості електричного сигналу. Такий підхід дозволив оцінити вплив шпаруватості електричного сигналу на режими роботи та динамічні показники досліджуваних котушок. **Результати.** В результаті проведення експериментального дослідження отримано часові характеристики чотирьох зразків шляхових котушок для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, зокрема час наростання струму, величини сили тяги, а також температурні режими під навантаженням. Встановлено, що котушка з маркуванням «А» характеризується відносно високими

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

динамічними показниками, а саме: найменшим часом виходу на свій робочий режим, який становить 0,4 с, найбільшою силою тяги, яка становить 1,39 Н. В цілому ці показники дозволяють визначити котушку з маркуванням «А» як найбільш раціональний варіант для використання у натурній моделі. **Наукова новизна.** Створені передумови для подальшого формування характеристик натурної моделі дво-режимного магнітолевітаційного модулю. Вперше отримані динамічні показники шляхової котушки для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту під час лабораторного дослідження її експериментальних зразків. **Практична значимість.** За результатами досліджень розроблена методика, яка полягає у становленні зв'язку між конструкційними параметрами котушки та її динамічними показниками, що дає змогу встановити раціональні параметри шляхової котушки. Визначено параметри електродинамічного процесу, зокрема, час наростання струму, величину сили тяги, а також проаналізовано температурні режими роботи котушки в умовах експериментального навантаження.

Ключові слова: натурна модель; шляхова котушка; магнітолевітаційний транспорт; шляхова структура; динамічні показники

Вступ

В умовах сьогодення такий вид транспорту як магнітолевітаційний грає не останню роль у розвитку транспортних систем [1]. Підвищення швидкості руху та сили тяги в традиційних залізничних системах обмежено силами зчеплення з поверхнею, по якій прямує екіпаж. Не менш важливим є використання енергетичних ресурсів та екологічна безпека, яка безпосередньо від цього залежить. Транспортні системи, які працюють на двигунах внутрішнього згорання, мають негативний вплив через викид шкідливих газів у навколишнє середовище [3].

Одними з переваг магнітолевітаційного транспорту є безумовно висока швидкість, яку він розвиває, а також можливість із застосуванням електромагнітних сил левітувати, переміщуватися вздовж шляху та стабілізувати рухомий склад без фізичного контакту з поверхньою шляху. Проте, щоб досягти цього з'являється потреба в ідеальній синергії між рухомим складом та шляховою структурою задля цілісної роботи всієї системи.

Вздовж шляхової структури в бортах встановлені котушки, які дозволяють рухомому складу підтримувати ефект левітації, тяги та стабілізації шляхом взаємодії їх з бортовими магнітами.

Водночас, актуальним є питання розвитку шляхових структур для поєднання функцій тяги та левітації. В роботі [2] автори запропонували концепцію дво-режимного тягово-левітаційного модуля, де одна котушка може змінювати режим роботи і забезпечувати як тягу, так і левітацію шляхом зміни електричної схеми з'єднання. Такий підхід вимагає більш глибоке розуміння динамічних показників

шляхових котушок, що підкреслює актуальність дослідження.

Слід зазначити, що не менш важливу роль грають динамічні показники шляхової котушки. Під динамічними показниками котушок маються на увазі часові характеристики, тобто час, за який кожна з котушок вийде на свою робочу частоту, при якому її електромагнітні сили будуть максимальними. Також максимальною має бути сила тяги, яка діє на магніт. Температурні показники котушок під час роботи системи мають бути прийнятними задля забезпечення коректної роботи та відсутності перегріву елементів.

Результати досліджень [5] допоможуть зрозуміти більш детально про динамічний відгук високошвидкісної системи магнітолевітаційного транспорту.

Автори [7] використовують самостійно розроблений пристрій для вимірювання динамічного магнетизму для проведення довготривалого динамічного експерименту за допомогою методу напруженості магнітного поля H і основної електромагнітної формули надпровідників. На основі своїх досліджень вони дослідили спад висоти левітації потягу маглев при тривалому віброзбудженні рухомого складу.

В роботі [4] автори висвітлюють дослідження, спрямоване на зв'язок між тепловим ефектом і стійкістю системи левітації, збудженої зовнішнім джерелом. Отримані результати показують, що тепловий ефект і стабільність системи левітації залежать головним чином від деяких параметрів, пов'язаних із зовнішнім джерелом, таких як частота та амплітуда прикладеного зовнішнього джерела.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На відміну від інших, автори [12] досліджують поведінку струмопровідних котушок, збудованих імпульсним струмом. З цього дослідження зроблений висновок про те, що динамічна стабільність залежить від величин сталого робочого струму, піку та тривалості імпульсного струму.

Автори [10] зосереджують увагу на аналізі динамічної взаємної індуктивності між котушками через неузгодженість, оскільки вона має значний вплив на процес заряджання електромобіля, зокрема на вихідну потужність і загальну ефективність, а також показують, що вихідна потужність зменшується зі збільшенням поперечного зсуву між котушками передавача та приймача. Крім того, на вихідні характеристики системи суттєво впливає ступінь зв'язку між передавальною та приймальною котушками.

У статті [11] представлено метод вимірювання для оцінки коефіцієнта температуропровідності, об'ємної теплоємності та питомого опору шихтового матеріалу як функції температури на одній вимірювальній установці з використанням генератора індукційного нагріву як джерела сигналів. Метод заснований на дослідженні температурних відгуків циліндричних зразків досліджуваних матеріалів і напруги, індукованої в розробленій вимірювальній котушці після короткочасних або тривалих ступінчастих імпульсів збудження.

Дослідники [9] пропонують науковий метод, що використовує поєднання комп'ютерного моделювання, щоб заздалегідь виявити перегрівання та оптимізувати охолодження, тим самим збільшуючи термін служби котушок.

Проведений аналіз сучасних джерел інформації доводить актуальність досліджень, представлених у даній статті.

Мета

Одними з переваг магнітолевітаційного транспорту є безумовно висока швидкість, яку він розвиває, а також можливість із застосуванням електромагнітних сил левітувати, переміщуватися вздовж шляху та стабілізувати рухомий склад без фізичного контакту з поверхню шляху. Проте, щоб досягти цього з'являється потреба в ідеальній синергії між рухомим складом та шляховою структурою задля цілісної роботи всієї системи.

Одне з завдань впровадження магнітолевітаційного транспорту є розв'язання низки проблем, які безпосередньо стосуються визначення параметрів шляхової котушки.

Ідея роботи полягає в експериментальному дослідженні динамічних показників шляхових котушок натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту з подальшим порівнянням їх характеристик для обґрунтованого вибору раціональної котушки за такими критеріями як: час наростання струму та сила тяги.

Методика

Досліджування були виконані експериментальним шляхом. Спеціально для цих потреб було розроблено стенд для визначення динамічних показників шляхових котушок. До основних динамічних показників відносимо: час наростання струму у котушці, до допоміжних: силу тяги та температурні режими.

Принцип роботи стенда базується на незалежному живленні керуючого елемента, що подає сигнал на котушку, яка в свою чергу також має своє джерело з напругою живлення 12 В. Керуючим елементом даного стенду слугує мікроконтролер Arduino, який генерує поодинокі імпульси для котушки шляхом відкриття транзистора, після чого вона генерує магнітне поле та починає взаємодію з магнітом.

Довжина імпульсу та паузи обумовлена роботою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Схема експериментального дослідження динамічних показників шляхових котушок представлена на рис. 1.

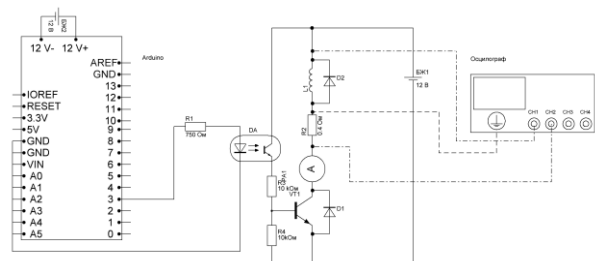


Рис. 1. Схема експериментального стенду з дослідження динамічних показників котушок

Fig. 1. Diagram of the experimental stand for studying the dynamic performance of coils

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Використання в цьому випадку оптопари обумовлено тим, щоб створити гальванічну розв'язку між Arduino та силовою частиною схеми з транзистором та котушкою. Резистори у вихідному колі оптопари забезпечують заданий режим роботи транзистора VT1. Резистор R3 обмежує базове значення струму, який поступає на базу транзистора, тим самим запобігаючи його перенавантаженню. Натомість резистор R4 запобігає хибним включенням транзистора. Резистор R2 виконує функцію шунта для виміру струму котушки L1.

Часові характеристики були отримані за допомогою осцилографа (RIGOL DS1104B).

Фото експериментального стенду представлено на рис. 2.

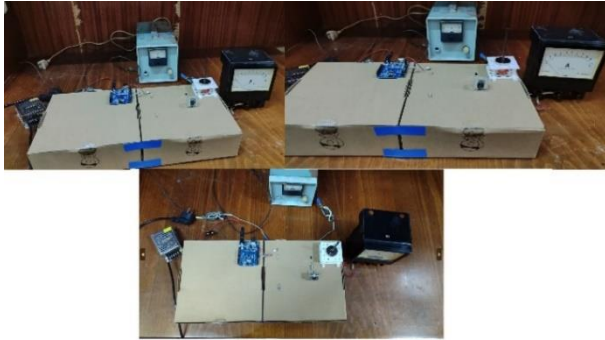


Рис. 2. Експериментальна установка для визначення динамічних показників котушок натурної моделі

Fig. 2. Experimental system for determining the dynamic performance of coils of a full-scale model

Для вимірювання сили тяги шляхових котушок використовувався вантаж у вигляді стакану, який припадає до магніту та в середині містить певну кількість немагнітних кульок, щоб не завадити роботі магніту. Гранічне значення сили тяги визначалося моментом відриву чаші з вантажем від опори. Максимальний вантаж, який може підіймати котушка при заданому струмі та часі роботи (імпульсний режим), і є сила тяги, яку представлено надалі в статті.

Під час дослідження були враховані як вага самого стакану, так і вантаж що знаходився в ньому. Стакан та вантаж зображено на рис. 3.



Рис. 3. Стакан та вантаж

Fig. 3. Cup and weight

Температурні показники шляхових котушок знімалися за допомогою тепловізора UNI-T-UTi320E.

В експериментальному дослідженні динамічних показників використовувалися чотири зразки котушок, які розрізняються між собою за параметрами, але мають спільну конструкцію, яка обумовлена конструкцією натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. Параметри котушок наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри досліджувальних котушок

Table 1

Parameters of the test coils

Котушка	Діаметр дроту, мм	Кількість витків, п	Опір котушки, Ом
A	0,45	112	1,4
B	0,36	272	4,5
C	0,27	550	18,1
D	0,24	720	26,3

Результати

Першим дослідженням є експериментальне визначення часу, за який кожна з котушок вийде на свою робочу частоту. В якості робочої частоти прийнято частоту сигналу типу «меандр», при якій струм котушки сягає сталого значення. Аналізуючи форму струму, отримували основний динамічний показник котушки, а саме час наростання струму. Результат представлений на рис. 4.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

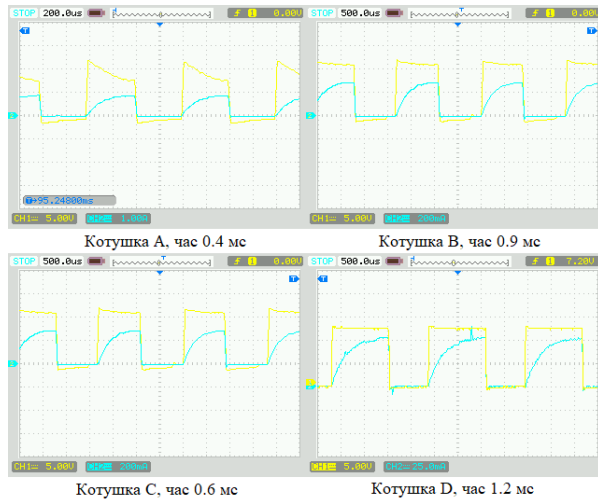


Рис. 4. Робочий час кожної котушки

Fig. 4. Working time of each coil

Результати визначення робочої частоти котушок представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Визначення робочих частот котушок

Table 2

Determination of coil operating frequencies

Котушка	t_{imp} , мс	t_{pause} , мс	T , мс	f , Гц
A	0,4	0,4	0,8	1250
B	0,9	0,9	1,8	555,6
C	0,6	0,6	1,2	833,4
D	1,2	1,2	2,4	416,7

Процес експериментальних досліджень має стохастичний характер, що потребувало відповідної статистичної обробки результатів. Для кожної з котушок було проведено по 10 вимірювань, довжини імпульсу та паузи при цьому залишалися незмінними. Результати вимірювань представлені в табл. 3 та на рис. 5.

Також побудовано статистичні графіки цих вимірювань, що зображено на рис. 5.

Наступним експериментом була зміна шпаруватості сигналу. Це дозволило оцінити динаміку перехідних процесів, які протікають в котушках під час їх роботи, тобто при зміні довжини імпульсу та паузи можливо побачити, яку поведінку мають шляхові котушки в різних режимах роботи та чи виходять вони на робочу частоту.

Таблиця 3

Отримані результати вимірювань котушок

Table 3

Results of coil measurements obtained

Вимірювання	Кот. А	Кот. В	Кот. С	Кот. D
	Час до досягнення робочого стану, us			
1	280	682	560	1 040
2	300	680	520	1 080
3	320	640	563	1 070
4	304	720	542	1 045
5	260	684	480	1 040
6	272	680	522	1 130
7	288	684	590	1 038
8	236	648	505	1 120
9	280	676	522	1 010
10	336	664	563	1 035

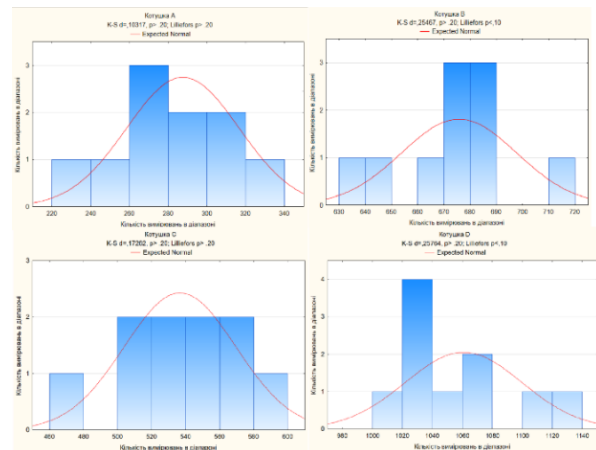


Рис. 5. Статистичний розподіл отриманих значень часу котушок

Fig. 5. Statistical distribution of the obtained coil time values

Також завдяки зміні шпаруватості можливо визначити втрати котушок через нагрів. Якщо для будь-якої з котушок буде надвисока шпаруватість, струм, який протікає через неї, може викликати втрати, пов'язані з нагрівом, що суттєво впливає на тепловий режим роботи котушки та може призвести до руйнування пластикового каркаса. Необхідно забезпечити виключення пластичної деформації елементів стенда під впливом температури. Так само зміна шпаруватості впливає на температурний режим

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

транзистора, який підсилює сигнали керування з мікроконтролера Arduino.

Параметри зміни шпаруватості для кожної з котушок представлені у табл. 4, а також в графічному вигляді на рис. 7–10.

Таблиця 4

Визначення характеристик котушок з різною шпаруватістю сигналу

Table 4

Determining the characteristics of coils with different signal strengths

Котушка	T	t imp, мс	t pauza, мс	T, мс	f, кГц
A	1/2	0,2	0,6	0,8	1 250
	1/4	0,1	0,7	0,8	1 250
	1/8	0,05	0,75	0,8	1 250
B	1/2	0,45	1,35	1,8	555
	1/4	0,225	1,58	1,8	555
	1/8	0,113	1,68	1,8	555
C	1/2	0,3	0,9	1,2	833
	1/4	0,15	1,05	1,2	833
	1/8	0,075	1,13	1,2	833
D	1/2	0,6	1,8	2,4	416
	1/4	0,3	2,1	2,4	416
	1/8	0,15	2,25	2,4	416

Результати досліджень котушок зі зміною шпаруватості представлені на рис. 7–10.

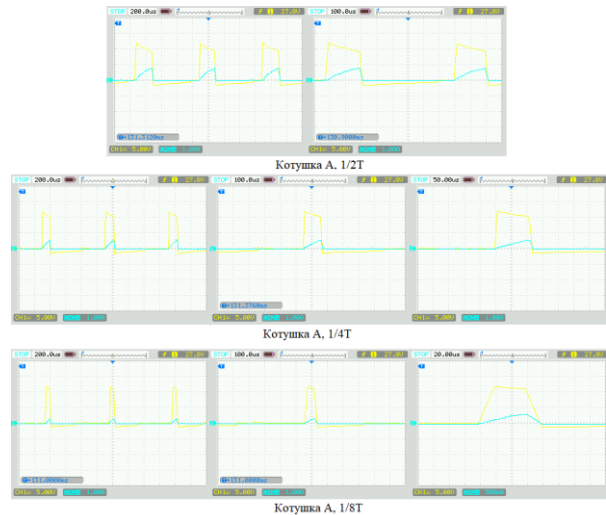


Рис. 7. Зміна шпаруватості котушки А

Fig. 7. Changing the coil A's permittivity

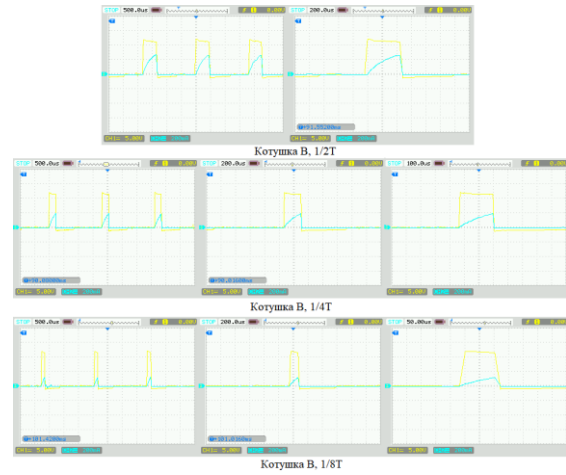


Рис. 8. Зміна шпаруватості котушки В

Fig. 8. Changing the coil B permittivity

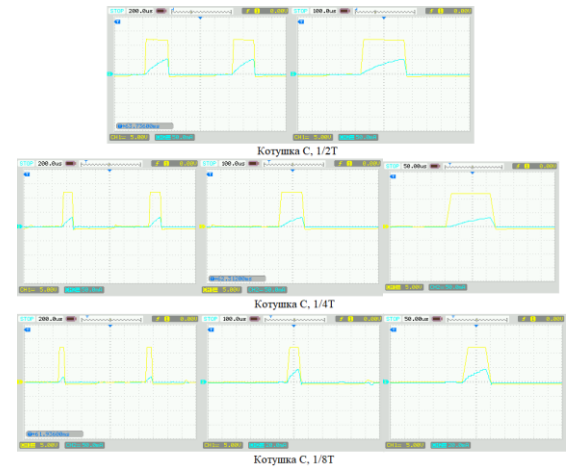


Рисунок 9. Зміна шпаруватості котушки С

Fig. 9. Changing the coil C permittivity

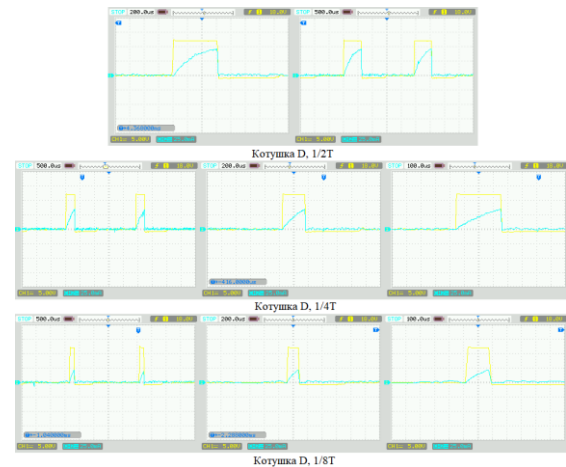


Рис. 10. Зміна шпаруватості котушки D

Fig. 10. Changing the coil D permittivity

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Дослідження температурних показників шляхових котушок дозволить зрозуміти, наскільки безпечно і стабільно буде працювати катушка в реальних умовах експлуатації стенда.

Кожна з котушок працювала приблизно одну хвилину, кожні 5 секунд проводився замір температури як катушки, так і транзистора. Експеримент був проведений під час максимального навантаження катушки. Для зручності на ілюстраціях зображено перші секунди виміру, коли катушка тільки починає працювати, та останні. Результати експериментальних вимірювань температури представлені на рис. 11–14.

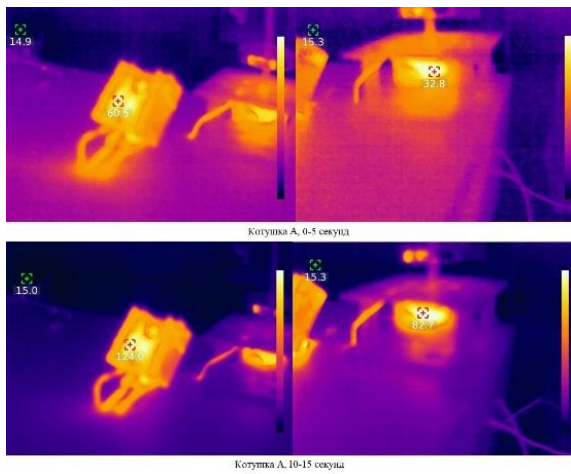


Рис. 11. Температурні показники катушки А:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 11. Temperature characteristics of coil A:
1 – transistor; 2 – coil

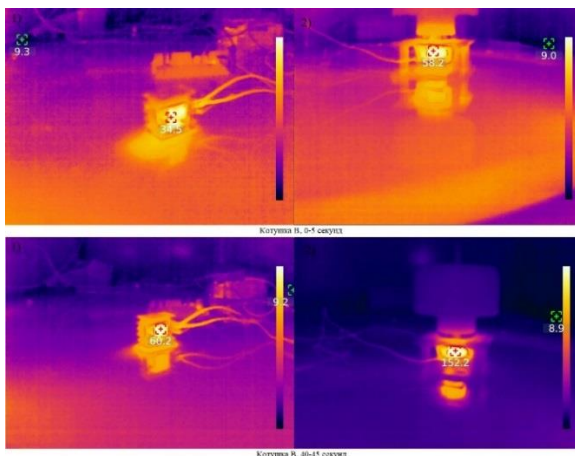


Рис. 12. Температурні показники катушки В:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 12. Temperature characteristics of coil B:
1 – transistor; 2 – coil

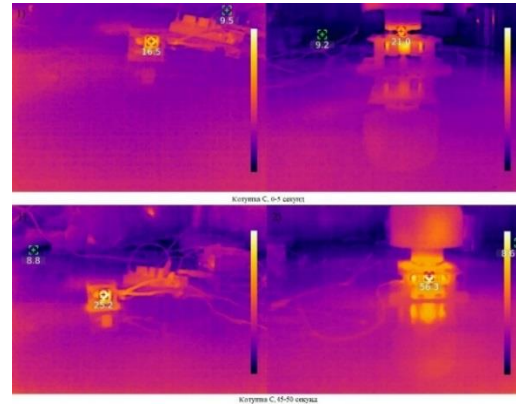


Рис. 13. Температурні показники катушки С:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 13. Temperature characteristics of coil C:
1 – transistor; 2 – coil

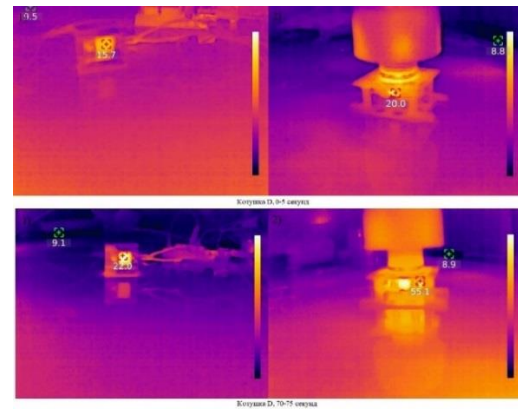


Рис. 14. Температурні показники катушки D:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 14. Temperature characteristics of coil D:
1 – transistor; 2 – coil

Отримані результати також представлені у табличному вигляді, табл. 5–8.

Таблиця 5

Температурні показники шляхової катушки А під час навантаження

Table 5

Temperature characteristics of track coil A under load

Час, с	Температура, °С	
	Транзистор	Катушка
0–5	60,5	32,8
5–10	91,2	59,8
10–15	124	82,7

Таблиця 6

Температурні показники шляхової котушки В під час навантаження

Table 6

Temperature characteristics of track coil B under load

Час, с	Температура, °С	
	Транзистор	Котушка
0–5	34,5	58,2
5–10	42,5	79,5
10–15	47,6	95,5
15–20	50,3	109
20–25	52,5	120
25–30	54,7	132
30–35	56,9	134
35–40	58,5	145
40–45	60,2	152

Таблиця 7

Температурні показники шляхової котушки С під час навантаження

Table 7

Temperature characteristics of track coil C under load

Час, с	Температура, °С	
	Транзистор	Котушка
0–5	16,5	21
5–10	18,9	30,2
10–15	20,1	34,9
15–20	21,4	39,5
20–25	22,1	42,4
25–30	22,9	44,8
30–35	23,5	48,3
35–40	24,2	50,9
40–45	24,7	53,4
45–50	25,2	56,3

Таблиця 8

Температурні показники шляхової котушки D під час навантаження

Table 8

Temperature characteristics of track coil D under load

Час, с	Температура, °С	
	Транзистор	Котушка
0–5	15,7	20
5–10	16,7	22,4
10–15	16,9	23,8
15–20	17,1	25,7
20–25	17,2	28,9
25–30	17,8	31,9
30–35	18,4	36,3
35–40	18,8	36,9
40–45	19,2	38,3
45–50	19,5	42,9
50–55	20,3	46,4
55–60	20,5	47,5
60–65	20,9	50,1
65–70	21,6	53,1
70–75	22	55,1

За отриманими результатами температур спостерігається залежність, чим менше витків і більший діаметр проводу котушки, тим стрімкіше зростає температура під час її навантаження.

Для визначення максимальної сили тяги котушок, під час роботи стенду поступово навантажували магніт, який взаємодіяв з котушкою до тих пір, поки котушка не припиняла утримувати магніт у повітрі (рис. 3). Результати визначення максимальної сили тяги представлені на рис. 15, а також у табл. 9.

Враховуючи всі попередні експерименти стосовно дослідження динамічних показників шляхових котушок, можна зробити висновок, що для подальшої роботи з натурною моделлю високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту серед усіх підходить котушка з маркуванням «А», оскільки вона має відносно високі

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

динамічні показники, а саме: найменший час виходу на свій робочий режим, який становить 0,4 с, та найбільшу силу тяги, яка становить 1,39 Н. В цілому ці показники дозволяють визначити котушку з маркуванням «А» як найбільш раціональний варіант для використання у натурній моделі.



Рис. 15. Результати з визначення максимальної тяги

Fig. 15. Results for determining maximum traction

Таблиця 9

Показники тяги шляхових котушок

Table 9

Traction characteristics of track coils

Котушка	Маса левітуючої платформи, г
A	139
B	126
C	60,1
D	55,8

Наукова новизна та практична значимість

Створені передумови для подальшого формування характеристик натурної моделі дво-режимного магнітолевітаційного модулю. Вперше отримані динамічні показники шляхової котушки для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

За результатами досліджень розроблена методика, яка полягає у становленні зв'язку між конструкційними параметрами котушки та її динамічними показниками, що дає змогу встановити раціональні параметри шляхової котушки. Визначено такі параметри електродинамічного процесу як час наростання струму та сила тяги, а також проаналізовано температурні режими роботи котушок в умовах експериментального навантаження.

Висновки

Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту відкриває можливість у встановленні зв'язку між конструкційними параметрами котушки та її динамічними показниками.

В результаті проведення експериментального дослідження отримано часові характеристики чотирьох зразків шляхових котушок для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, а саме: час наростання струму та сили тяги, а також характеристики температурних режимів котушок під навантаженням.

Встановлено, що котушка з маркуванням «А» характеризується відносно високими динамічними показниками, а саме: найменшим часом виходу на свій робочий режим, який становить 0,4 с, та найбільшою силою тяги, яка становить 1,39 Н. В цілому ці показники дозволяють визначити котушку з маркуванням «А» як найбільш раціональний варіант для використання у натурній моделі.

Отримані результати становлять важливу науково-технічну базу для розробки й впровадження перспективних транспортних систем на основі магнітної левітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Муха А. М., Плаксіні С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
2. Плаксіні С., Муха А., Устименко Д., Шпиль Ю., Голота О., Чуприна Є. 2-х режимний тягово-левітаційний модуль перспективної магнітно-левітаційної транспортної системи. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. № 2 (58). С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>
3. Чуприна Є. М., Муха А. М., Бондар О. І., Плаксіні С. В. Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 3 (107). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313862>
4. Alloui L., Ben Alia K., Bouillault F., Mimoune S. M., Bernard L., Lévêque J. Numerical study of the relation between the thermal effect and the stability of the levitation system excited by an external source. *Physica C: Superconductivity*. 2013. Vol. 487. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.01.010>
5. Dai J., Lim J. G. Y., Ang K. K. Dynamic response analysis of high-speed maglev-guideway system. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2023. Vol. 11(6). P. 2647–2658. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00995-5>
6. Fu S., Deng Z., Han W., Gao X., Zhou Y. Modeling and analysis of a novel levitation magnet with damping coils for high-speed maglev train. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, Iss. 12. P. 5247. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16125247>
7. Lei W., Zheng J., Huang Z., Zhang W., Deng Z. Study of long-time levitation performance of high temperature superconducting maglev under vertical vibration. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2022. Vol. 600. 1354099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2022.1354099>
8. Lim J., Lee C.-Y., Oh Y. J., Jo J.-M., Lee J.-H., Lee K.-S., Choi S. Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop. *Scientific Reports*. 2021. 11(1). 23499. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02907-7>
9. Nemkov V., Goldstein R. Increasing inductor life by predicting coil copper temperatures. 2007. P. 44–49. URL: https://www.researchgate.net/publication/294641749_Increasing_inductor_life_by_predicting_coil_copper_temperatures
10. Rakhymbay A., Khamitov A., Bagheri M., Alimkhanuly B., Lu M., Phung T. Precise Analysis on Mutual Inductance Variation in Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle. *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 3. 624. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11030624>
11. Zgraja J. Method of Determining the Temperature Characteristics of the Thermal and Electrical Properties of Conductive Materials on a Stand for Induction Heating. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 14. 5309. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145309>
12. Zheng X. J., Zhou Y. H., Yang X. P., Miya K. Analysis on dynamic stability of superconducting coils in a three-coil partial torus. *Fusion Engineering and Design*. 2001. Vol. 54, Iss. 1. P. 31–39. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0920-3796\(00\)00100-9](https://doi.org/10.1016/s0920-3796(00)00100-9)

Y. M. CHUPRYNA^{1*}, A. M. MUKHA^{2*}, O. I. BONDAR^{3*}, S. V. PŁAKSIN^{4*},
D. V. USTYMENKO^{5,6*}, O. O. HOŁOTA^{7*}

^{1*}Dep. «Electrical engineering and electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technology, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 360 37 88, e-mail nesty.lords@gmail.com, ORCID 0000-0002-0986-1283

^{2*}Dep. «Electrical engineering and electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technology, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Dep. «Electrical engineering and electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technology, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 333 88 96, e-mail etemdiit@gmail.com, ORCID 0000-0003-3884-5589

^{4*}Dep. of Vehicle Control Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{5*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{6*}Dep. of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{7*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

Research of the Dynamic Indicators of the Track Coil of a Full-Scale Model of High-Speed Magnetic Levitation Transport

Purpose. The main idea of the work is to experimentally study the dynamic performance of the track coils of a physical model of high-speed magnetolevitation transport with further comparison of their characteristics for a reasonable choice of a rational coil according to such criteria as current rise time and thrust force. **Methodology.** The research was carried out experimentally. A test bench for determining the dynamic characteristics of track coils was developed specifically for these purposes. The main dynamic indicators include: the time of current rise in the coil, and the auxiliary indicators include: traction force and temperature conditions. Measurements of the time characteristics, in particular, the current rise, were carried out using an oscilloscope, and the traction force was determined by gradually loading a platform mounted on a levitating magnet with a non-magnetic load. Temperature conditions were recorded using a thermal imager. During the work, four types of coils were studied, which differ from each other in such indicators as wire diameter, number of turns, electrical resistance, and inductance. For each of the coils, a series of measurements were made taking into account changes in the duty cycle of the electrical signal. This approach made it possible to assess the effect of the electrical signal duty cycle on the operating modes and dynamic performance of the coils under study. **Findings.** As a result of the experimental study, the time characteristics of four samples of track coils for a physical model of high-speed magnetolevitation transport were obtained, in particular, the time of current rise, the magnitude of the traction force, and the temperature conditions under load. It has been established that the coil labeled «A» is characterized by relatively high dynamic indicators, namely: the shortest time to reach its operating mode, which is 0.4 s, and the highest thrust, which is 139 g of cargo. In general, these indicators make it possible to determine the coil with the «A» marking as the most rational option for use in a full-scale model. **Originality.** The prerequisites for further characterization of the physical model of a two-mode magneto-levitation module are created. For the first time, the dynamic parameters of the track coil for a physical model of high-speed magneto-levitation transport were obtained during a laboratory study of its experimental samples. **Practical value.** Based on the results of the research, a methodology has been developed that establishes a link between the coil's structural parameters and its dynamic performance, which makes it possible to establish rational parameters of the track coil. The parameters of the electrodynamic process, in particular, the time of current rise, the magnitude of the traction force, and the temperature conditions of the coil operation under experimental load were determined.

Keywords: physical model; track coil; magnetic levitation transport; track structure; dynamic parameters

REFERENCES

1. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustyomenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*. 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
2. Plaksin, S., Mukha, A., Ustyomenko, D., Shpyl, Y., Holota, O., & Chupryna, Y. (2022). Two-mode traction-levitation module of a prospective magnetic levitation transport system. *Electromechanical and Energy Saving Systems*. 2(58), 49-53. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53> (in Ukrainian)
3. Chupryna, Y. M., Mukha, A. M., Bondar, O. I., & Plaksin, S. V. (2024). Investigation of the primary energy storage system of a traction photovoltaic module. *Science and Progress of Transport*. 3(107), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313862> (in Ukrainian)
4. Alloui, L., Ben Alia, K., Bouillault, F., Mimoune, S. M., Bernard, L., & Lévêque, J. (2013). Numerical study of the relation between the thermal effect and the stability of the levitation system excited by an external source. *Physica C: Superconductivity*. 487, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.01.010> (in English)
5. Dai, J., Lim, J. G. Y., & Ang, K. K. (2023). Dynamic response analysis of high-speed maglev-guideway system. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 11(6), 2647-2658. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00995-5> (in English)
6. Fu, S., Deng, Z., Han, W., Gao, X., & Zhou, Y. (2024). Modeling and analysis of a novel levitation magnet with damping coils for high-speed maglev train. *Sustainability*. 16(12), 5247. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16125247> (in English)
7. Lei, W., Zheng, J., Huang, Z., Zhang, W., & Deng, Z. (2022). Study of long-time levitation performance of high temperature superconducting maglev under vertical vibration. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 600, 1354099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2022.1354099> (in English)
8. Lim, J., Lee, C.-Y., Oh, Y. J., Jo, J.-M., Lee, J.-H., Lee, K.-S., & Choi, S. (2021). Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop. *Scientific Reports*. 11(1), 23499. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02907-7> (in English)
9. Nemkov, V., & Goldstein, R. (2007). Increasing inductor life by predicting coil copper temperatures. 44-49. URL: https://www.researchgate.net/publication/294641749-Increasing_inductor_life_by_predicting_coil_copper_temperatures (in English)
10. Rakhymbay, A., Khamitov, A., Bagheri, M., Alimkhanuly, B., Lu, M., & Phung, T. (2018). Precise Analysis on Mutual Inductance Variation in Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle. *Energies*. 11(3), 624. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11030624> (in English)
11. Zgraja, J. (2023). Method of Determining the Temperature Characteristics of the Thermal and Electrical Properties of Conductive Materials on a Stand for Induction Heating. *Energies*. 16(14), 5309. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145309> (in English)
12. Zheng, X. J., Zhou, Y. H., Yang, X. P., & Miya, K. (2001). Analysis on dynamic stability of superconducting coils in a three-coil partial torus. *Fusion Engineering and Design*. 54(1), 31-39. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0920-3796\(00\)00100-9](https://doi.org/10.1016/s0920-3796(00)00100-9) (in English)

Надійшла до редколегії: 09.05.2025

Прийнята до друку: 12.09.2025

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.159.2:624.131

В. С. АНДРЕЄВ^{1*}, В. О. П'ЄЛИК²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 480 11 33, ел. пошта v.s.andriev@ust.edu.ua, ORCID 0009-0006-3155-7452

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 492 03 22, ел. пошта VladislavNAVI@gmail.com, ORCID 0009-0002-7375-2388

Принципи та моделі розрахунку осідань фундаментів для розрахунку деформацій ґрунтових основ

Мета. У практиці інженерної діяльності часто виникає проблема розрахунку осідань фундаментів на шаруватій основі. При цьому не враховується той факт, що в основах із шаруватою текстурою розподіл напружень може суттєво відрізнитися від їхнього розподілу в однорідній основі. Зазначене негативно впливає на використовувані в даний час методики розрахунку осідань. Автори ставлять за мету проведення порівняльного аналізу принципів та моделей розрахунку осідань фундаментів під час визначення деформацій ґрунтових основ. **Методика.** Наявні в науково-технічній літературі дані свідчать про те, що використовувані в даний час методи розрахунку в ряді випадків не дозволяють досягти необхідної точності, оскільки вплив реологічних властивостей ґрунтової шаруватої основи та часові показники при визначенні нахилу фундаментів не враховуються. Також відомо, що однією з причин невідповідності розрахунків експлуатаційним параметрам є недостатньо повне врахування текстурних особливостей ґрунтової товщі, а саме шаруватості. Існуючі в даний час методи розрахунку осідань фундаментів або споруд на ґрунтовій основі, як правило, базуються на використанні рішень, отриманих у рамках моделі лінійно-пружного ізотропного середовища. У статті порівняно декілька моделей розрахунку осідань фундаментів під час розрахунку деформацій ґрунтових основ та проаналізовано їх принципи. **Результати.** Для вирішення даної задачі необхідно обґрунтувати аналітичні методи розрахунку осідань фундаментів. Існуючі методи дозволяють оцінити лише їх деякі показники, зважаючи на умовність використовуваних розрахункових моделей. Отримання достовірних результатів можливе лише із впровадженням комплексного підходу до оцінки спостережень за деформаціями основ. **Наукова новизна.** Полягає у виборі та обґрунтуванні рішень стосовно розрахунку осідань фундаментів під час розрахунку деформацій ґрунтових основ. **Практична значимість.** Полягає в розробці практичних рекомендацій щодо розрахунку осідань жорстких фундаментів з урахуванням шаруватості основи та тимчасових показників.

Ключові слова осідання; фундамент; деформації; модель; ґрунт

Вступ

В практиці інженерної діяльності часто виникає проблема розрахунку осідань фундаментів на шаруватій основі.

Наявні в науково-технічній літературі дані свідчать про те, що використовувані в даний час методи розрахунку в ряді випадків не дозволяють досягти необхідної точності, оскільки вплив реологічних властивостей ґрунтової шаруватої

основи та часові показники при визначенні нахилу фундаментів не враховуються.

Також відомо, що однією з причин невідповідності розрахунків експлуатаційним параметрам є недостатньо повне врахування текстурних особливостей ґрунтової товщі, а саме шаруватості.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Осідання фундаментів є основним критерієм, що визначає експлуатаційну придатність будівель та споруд.

Різноманітність наявних робіт обумовлена низкою причин, серед яких:

- різноманітність ґрунтових умов на підставі будівель та споруд;
- різноманітність конструктивних рішень щодо дослідження фундаментів, а також вирішення питань реконструкції будівель та споруд;
- умови експлуатації та функціональні особливості будівель та споруд.

В даний час методикою ДСТУ [1] передбачаються такі вимоги:

1. Тиск під подошвою фундаменту має перевищувати деякої граничної величини розрахункового опору ґрунту R .

2. При великих ексцентриситетах прикладання до фундаменту зовнішнього навантаження та специфічних ґрунтових умов має бути забезпечена несуча здатність основи по ґрунту.

Існуючі в даний час методи розрахунку осідань фундаментів або споруд на ґрунтовій основі, як правило, базуються на використанні рішень, отриманих у рамках моделі лінійно-пружного ізотропного середовища. При цьому не враховується той факт, що в основах із шаруватою текстурою розподіл напружень може суттєво відрізнитися від їхнього розподілу в однорідній основі.

Зазначене негативно впливає на використання в даний час методики розрахунку осідань.

Мета

Метою наукової статті є проведення порівняльного аналізу принципів та моделей розрахунку осідань фундаментів під час визначення деформацій ґрунтових основ.

Методика

Норми проектування основ фундаментів містять умовний прийом, заснований на обмеженні зони в основі, що деформується, по заданому співвідношенню вертикальних осьових нормальних напружень від зовнішнього навантаження і вертикальних напружень від власної ваги ґрунту [3].

Недолік експериментів визначення товщини деформованої зони, особливо в натурних умовах, пов'язаний з відсутністю способів визначення вихідного природного напруженого стану від дії власної ваги та порушення цілісності масиву при зануренні у нього вимірювальних приладів. Тому в технічній літературі містяться пропозиції низки дослідників щодо визначення товщини деформованої зони.

Деякі автори рекомендують для глинистих ґрунтів визначати потужність товщі, що деформується, виходячи з умови, що на її межі напруження дорівнюють структурній міцності ґрунту. За відсутності даних структурної міцності глибини стисливої товщі рекомендується приймати подвоєну товщину еквівалентного шару [3].

Відповідно до деяких рекомендацій основа приймається нестисливою на глибині, що дорівнює подвоєній потужності еквівалентного шару, котра визначена методом спроб для схеми стисливого шару кінцевої товщини згідно ДСТУ.

Для великорозмірних фундаментних плит, що зводяться на сильно стисливій основі, слід приймати товщину зони, що деформується, в межах 10...15 м.

За даними спостережень за пошаровими деформаціями основ, складених сильно стисливими ґрунтами, виміряна товщина більш ніж 2 рази перевищувала ширину фундаменту. Узагальнюючи результати експериментальних спостережень, низка дослідників розвитку пошарових деформацій на основі великорозмірних фундаментів (ширина $b > 10$ м), зазначається, що розміри деформованої зони залежать, в основному, від ґрунтових умов, причому в щільних ґрунтах товщина деформованої зони становить глибину дії, а для сильно стисливих ґрунтів розраховується за ДСТУ, причому в ряді випадків виміряна величина не перевищує розрахункову. Зазначене вище узгоджується з висновками, згідно з якими глибина товщі, що деформується, в основі гідротехнічних споруд коливається від 0,5 до 0,75 ширини подошви фундаменту [3].

Для умов близького залягання нестисливого ґрунту було запропоновано метод розрахунку осідань для пружного шару кінцевої товщини. Цей метод включений в ДБН поряд з розрахунком осідання за методом пружного півпростору. Умовність даного способу полягає у встанов-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ленні вихідного значення товщини зони, що деформується. Однак, ця розрахункова схема застосовується як для випадку залягання ґрунту практично стисливої основи ($E > 100$ МПа), так і у разі основи, завантаженої по великій площі ($b > 10$ м, $E > 10$ МПа).

У деяких роботах зі штампами площею $0,5 \dots 1,0$ м², встановлених на глинистих, піщаних та великоуламкових основах з вимірюванням пошарових деформацій у центральній частині круглих жорстких штампів. показано, що в глинистій основі:

1. Осідання штампів більш ніж на 90 % викликаються стисненням шару ґрунту товщиною $1,5b$ у центрі та $1,25b$ поблизу його краю. При цьому частка деформацій верхнього шару ґрунту завтовшки $0,5b$ у загальному осіданні штампів становить понад 70 % для центральної його частини та 85 % для крайової [3];

2. Товщина деформованої зони в часі (2,5 місяця) зберігає практично постійне значення, а деяке збільшення осідання, що спостерігається, відбувається за рахунок деформацій, котрі протікають у верхніх шарах глибиною $1,0b$.

У великоуламкових (з глинистим заповнювачем) і піщаних ґрунтах глибина зони, що деформується, не перевищувала $1,2$ і $1,5b$, при цьому 90 % деформацій протікала у верхньому шарі товщиною b .

Відзначено, що глибина зони, що деформується, приймається пропорційно збільшенню тиску, і виміряна товща в $1,5 \dots 2$ рази менше, ніж обчислена за нормами лінійно-деформованого півпростору [3].

Дослідженнями пошарових деформацій на основі впливу штампів і дослідних фундаментів встановлено, що виміряна зона, що деформується, в $1,5 \dots 2$ рази менша, ніж обчислена за ДСТУ [1, 4, 5, 8]. Фактична глибина зони, що деформується, у тому числі під фундаментами існуючих будівель, становить 50...60 % розрахункових значень [3].

Встановлено, що виміряна глибина товщі, що деформується, зменшується з підвищенням модуля деформації, тоді як її розрахункове значення не залежить від величини модуля деформації. Тому, чи вище це значення, то більше розбіжність між фактичними і розрахунковими

значеннями глибини стислої товщі; зі збільшенням розмірів подошви фундаментів зростає зона деформації основи.

Вимірювання пошарових деформацій у піщаній основі під жорстким круглим штампом показали, що 70 % деформацій відбувалося у шарі товщиною $1,5d$, а 80 % – у шарі, що дорівнює $2,0d$ (d – малий діаметр штампів). Зазначені дослідні проводились у ґрунтовому лотку зі штампом малого діаметра ($d = 28$ см, $F = 615$ см²) [3].

Спосіб визначення товщі, що деформується, по суті, базується на використанні за пропозицією Терцаги, результатів компресійних випробувань зразків непорушеного ґрунту, відібраних із різної глибини під подошвою фундаменту (рис. 1).

Наявність води в порах ґрунтових основ, повзучість ґрунтового скелета та незворотність деякої частки деформацій під час циклу «завантаження – розвантаження» є основними ознаками, що відрізняють від інших суцільних середовищ. Оскільки деформації ґрунтових основ характеризуються великою тривалістю, а в деяких випадках переміщення, що реалізуються після закінчення деякого часу, становлять значну частку від загального, проблемі прогнозу поточних деформацій присвячено велику кількість робіт [3].

Ґрунти, з яких складаються основи, як правило, мають природне походження зі складною історією виникнення. Отже, фізико-механічні властивості різних видів ґрунтів можуть відрізнятися.

При описі поведінки ґрунтів під навантаженням використовуються моделі дискретного і суцільного середовища.

Вперше завдання фільтраційної консолідації в рамках лінійної пружної консолідуєчої середовища була сформульована і вирішена для компресійного завдання К. Терцаги [2]. Як рівняння стану середовища було прийнято закон Гука. Оскільки завдання вирішувалося при постійному навантаженні, проблему вдалося звести до отримання значень порового тиску з подальшим визначенням напруження в ґрунтовому скелеті і його переміщень.

Отримані К. Терцаги [2] рішення при тих чи інших припущеннях використовуються в інженерній практиці і зараз. Однак прийняті ним співвідношення не дозволяють врахувати ряд особливостей ущільнення реальних ґрунтових

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

основ, а саме загасання епюри вертикальних напружень по глибині та просторовий характер роботи ґрунтових основ фундаментів. У зв'язку з цим з'явилася низка інженерних методів, сутність яких полягає у пошуку компромісу між фактичним напружено-деформованим станом ґрунту та отриманими в рамках компресійного завдання рішеннями.

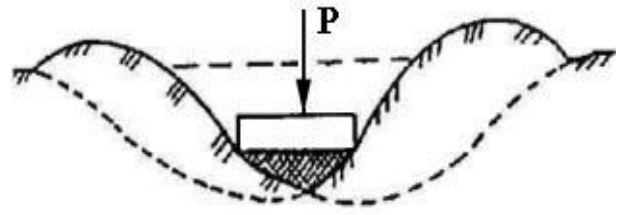
Найбільш досконалими серед вказаних методів є метод еквівалентного шару, суть якого зводиться до побудови рішення ґрунту, що знаходиться в умовах компресійного стиснення під впливом розподіленої певним чином по глибині об'ємного навантаження. При цьому закон зміни об'ємного навантаження відповідає епюрі розподілу вертикальної нормального напруження, розрахованої для випадку просторового завдання. Необхідно відзначити, що такий підхід, однак, не дозволяє повністю відобразити фактичний характер ущільнення ґрунтових основ, що знаходяться під впливом місцевого навантаження, оскільки при компресії немає можливості відтоку порової рідини в горизонтальному напрямку. Також було досліджено проблему консолідації при компресії середовищ зі шматково-лінійною зміною властивостей основ [3, 9].

Подальший розвиток теорія фільтраційної консолідації набула у роботах В. А. Флоріна та М. Біо [7, 8], які як рівняння стану прийняли узагальнений закон Гука. Це дозволило їм поширити результати Терцаги [2] у разі просторового напружено-деформованого стану.

Для випадку просторового напружено-деформованого стану та плоскої деформації розрахунків осідань фундаментів різної форми в рамках моделі пружного консолідованого середовища був виконаний раніше, і як розрахункову схему було прийнято модель водонасиченого півпростору (рис. 3).

У межах моделі пружного консолідуємого середовища для розрахункових схем півпростору отримав теоретичні залежності «середнє осідання – час». Результати надалі були узагальнені на випадок спадково-пружної консолідуємої основи. Однак, таке завдання було вирішено лише для штампу круглої форми при постійному навантаженні в часі, а для її вирішення був використаний наближений алгоритм.

a – a



б – б

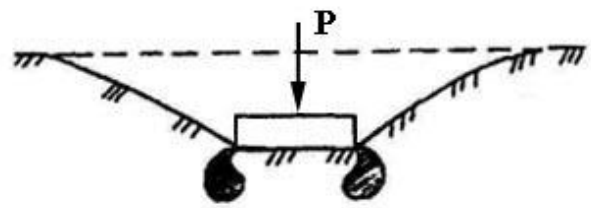


Рис. 1. Схема для розрахунку для шару кінцевої товщини:

a – основа працює в умовах граничної рівноваги;
б – пружного шару, працюючого в умовах змішаної задачі теорії пружності та теорії пластичності

Fig. 1. Scheme for calculation for a layer of finite thickness:

a – the base operates under conditions of limit equilibrium;
b – an elastic layer operating under conditions of a mixed problem of the theory of elasticity and the theory of plasticity

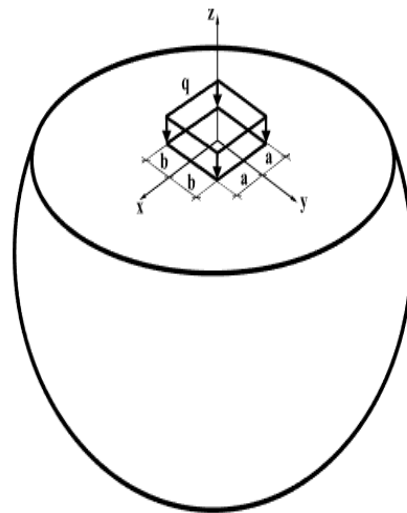


Рис. 2. Модель пружного півпростору

Fig. 2. Elastic half-space model

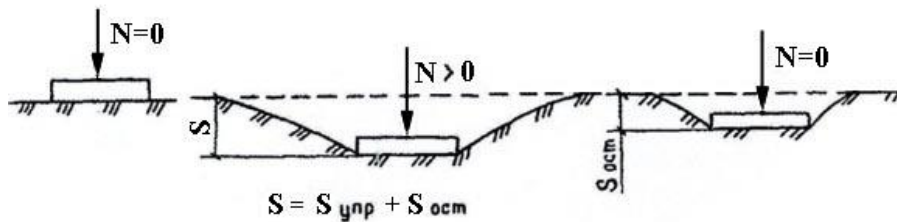


Рис. 3. Схема розрахункової моделі пружного лінійно-деформованого півпростору

Fig. 3. Scheme of the computational model of an elastic linearly deformed half-space

У цілому нині теоретичні залежності «осідання – час», встановлені під час врахування просторового напружено-деформованого стану, мають наближений характер і не дозволяють повною мірою враховувати вплив на характер ущільнення водонасичених основ змінної в часі зовнішнього навантаження. Незважаючи на зазначені недоліки, прийнята в нормативних документах методика розрахунку осідань в даний час є цілком прийнятною.

Допустимість застосування рішень теорії пружності визначення напруженого стану ґрунтового середовища залежить, переважно, від розмірів областей, у яких є граничний напружений стан. Якщо такі області відсутні або настільки малі порівняно з розмірами споруди (або площі завантаження), що ними можна знехтувати, то застосування рішень теорії пружності можливе і не викликає суттєвих заперечень [3].

Для визначення напруженого стану ґрунтів в умовах одноразового застосування навантаження становлять інтерес не пружні властивості земляного середовища, а застосовність закону Гука. Використання розрахункової моделі лінійно-деформованого середовища широко застосовується під час проектування для визначення напруженого стану ґрунтового середовища особливо з метою встановлення очікуваних величин осідань, нахилів та інших зсувів споруд, що зводяться при виконанні практичних розрахунків [3].

Також щодо осідань фундаментів виходячи з уявлень його деформування як пружного півпростору (рис. 2), застосовується метод скінченних елементів. Цей метод є потужним засобом для вирішення кола завдань, що описуються диференціальними рівняннями.

При вирішенні завдань механіки ґрунтів методом скінченних елементів розрахункова область,

яка може бути ґрунтовим масивом різної складності, розбивається на кілька підобластей, званих скінченними елементами. В елементах виділяються точки, які називають вузловими точками або вузлами.

Результати

Таким чином, проблема розрахунку залежностей «осідання – час» для фундаментів при змінному в часі навантаженні вимагає свого вирішення.

Під час будівництва споруди, навіть якщо міцність ґрунту забезпечена, виникають деформації основи. Як правило, вони мають нерівномірний характер та викликають перерозподіл зусиль у конструкціях споруди. За певних умов це може ускладнити нормальну експлуатацію споруди, а в деяких випадках навіть призвести до її аварії.

Зазначимо, що залежність між осіданнями поверхні ґрунтової основи та діючими навантаженнями $s = f(p)$ має нелінійний характер.

Однак встановлено, що в деякому інтервалі навантажень, що відповідає фазі ущільнення ґрунту, ця залежність близька до лінійної та розвиток осідань у часі завжди має загасаючий характер.

Час розвитку осідань водонасичених ґрунтів пов'язаний зі швидкістю фільтрації води в ґрунті. Відомо, що процеси фільтрації в глинистих ґрунтах протікають суттєво повільніше, ніж у піщаних. Характер кривих $s = f(t)$ цих фундаментів буде кардинально різним.

Абсолютне осідання окремого фундаменту визначається як середнє вертикальне переміщення подошви фундаменту. Знаючи величини осад для різних фундаментів, можна оцінювати нерівномірність деформацій основи та конструкції споруди.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у розробці та обґрунтуванні аналітичних рішень та практичних рекомендацій для визначення кренів фундаментів на водонасиченій шаруватій основі, зокрема розробці алгоритму рішення визначення напружено-деформованого стану водонасичених основ позакентрово-навантажених фундаментів, що мають властивості повзучості.

Практична значимість полягає в розробці практичних рекомендацій щодо розрахунку осідань жорстких фундаментів з урахуванням шаруватості основи та тимчасових показників, зокрема в методиці розрахунку осідань фундаментів, що дозволяє більш повно враховувати реальний напружено-деформований стан, у тому

числі з урахуванням реологічних властивостей (фільтраційної консолідації та повзучості ґрунтового скелета).

Висновки

Викладені у статті результати аналітичних досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1. Існує актуальна проблема розрахунку осідань фундаментів на властивістю повзучості водонасиченій ґрунтовій основі.

2. Нормативні документи, що нині діють, не дозволяють прогнозувати осідання фундаментів на властивості повзучості водонасиченої основи в часі.

3. У нормативних документах відсутні рекомендації щодо розрахунку осідань фундаментів на шаруватій ґрунтовій основі сучасними методами, зокрема, методом скінченних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.1-10:2018. *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2019. 40 с.
2. Зоценко М. Л., Коваленко В. І., Хілобок В. Г., Яковлев А. В. *Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи та фундаменти*. Київ : Вища школа, 2004.
3. Харченко В. В., Петренко В. Д. Обґрунтування вибору моделі основи та фундаменту будівлі під час її підсилення мікропалями. *Мости та тунелі: Теорія, дослідження, практика*. 2023. № 23. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281162>
4. Шаповал А. В., Шаповал В. Г., Моркляник Б. В., Андреев В. С. *Варіаційні методи граничних елементів та сплайнів у контактних задачах* : монографія. Львів : Друк-Захід, 2016. 96 с.
5. Шаповал А. В., Нестерова Е. В., Кабрель В. И., Шокарев Е. А., Причина Е. С., Легенченко В. А., Титякова Е. С., Шаповал В. Г., Андреев В. С. К вопросу математического моделирования осадок фундаментов с прямоугольной формой подошвы на грунтовом слое конечной толщины. *Проблеми використання інформаційних технологій у сфері освіти, науки та промисловості* : тези доп. X міжнар. конф. (Дніпропетровськ, 30-31 січ. 2013). Дніпропетровськ : НГУ, 2013. С. 69–70. URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/58eb6a4e-0142-4d42-b0ac-76ea797fe02f>
6. Швец В. Б., Шаповал В. Г., Петренко В. Д., Андреев В. С., Селихова Т. А., Тютькин А. Л. *Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях* : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2008. 274 с.
7. Biot M. A. Effect of Certain Discontinuities on Pressure Distributions in a Loaded Soil. *Physics*. 1935. Vol. 6, Iss. 12. P. 367–375. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1745279>
8. Biot M. A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Physics*. 1941. Vol 12, Iss. 2. P. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1712886>
9. Shapoval V., Shashenko O., Hapiev S., Khalymendyk O., Andrieiev V. Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*. 2020. Vol. 14, Iss. 1, P. 91–99. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.01.091>

V. S. ANDRIEIEV^{1*}, V. O. PIELYK²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 480 11 33, e-mail v.s.andrieiev@ust.edu.ua, ORCID 0009-0006-3155-7452

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 492 03 22, e-mail VladislavNAVI@gmail.com, ORCID 0009-0002-7375-2388

Principles and Models for Calculating Foundation Settlements for Calculating Soil Base Deformations

Purpose. In engineering practice, the problem of calculating the settlement of foundations on a layered base often arises. The authors set the goal of conducting a comparative analysis of the issues of principles and models for calculating foundation settlements when calculating deformations of soil foundations. **Methodology.** Data available in scientific and technical literature indicate that the calculation methods currently in use do not allow the necessary accuracy to be achieved in a number of cases, since the influence of the rheological properties of the layered soil base and time indicators are not taken into account when determining the inclination of foundations. It is also known that one of the reasons for the discrepancy between calculations and operational parameters is the insufficiently complete account of the textural features of the soil layer, namely its layering. Current methods for calculating the settlement of foundations or structures on soil bases are usually based on solutions obtained within the framework of a linear-elastic isotropic medium model. However, this does not take into account the fact that in foundations with a layered texture, the distribution of stresses can differ significantly from their distribution in a homogeneous foundation. This has a negative impact on the methods currently used to calculate settlement. The article compares several models for calculating foundation settlements when calculating deformations of soil foundations and analyzes their principles. **Finding.** To solve this problem, it is necessary to substantiate analytical methods for calculating foundation settlements. Existing methods allow us to evaluate only some of their indicators, taking into account the conventionality of the calculation models used. Obtaining reliable results is possible only with a comprehensive approach to evaluating observations of foundation deformations. **Originality.** Lies in the selection and justification of solutions for calculating foundation settlements when calculating deformations of soil foundations. **Practical value.** Develop practical recommendations for calculating the settlement of rigid foundations, taking into account the layering of the base and temporary indicators.

Keywords: settlement; foundation; deformations; model; soil

REFERENCES

1. *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*, 40 DBN V.2.1-10:2018. (2019). (in Ukrainian)
2. Zotsenko, M. L., Kovalenko, V. I., Khilobok, V. H., & Yakovliev, A. V. (2004). *Inzhenerna heolohiia: Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenti*. Kyiv: Vyscha shkola. (in Ukrainian)
3. Kharchenko, V. V., & Petrenko, V. D. (2023). Justification of the choice of the model of the building's base and foundation of the building during its reinforcement with micropiles. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 23, 88-94. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281162> (in Ukrainian)
4. Shapoval, A. V., Shapoval, V. H., Morklianyk, B. V., & Andriev, V. S. (2016). *Variatsiini metody hranychnykh elementiv ta splainiv u kontaknykh zadachakh*: monohrafiia. Lviv: Druk-Zakhid.
5. Shapoval, A. V., Nesterova, E. V., Kabrel, V. Y., Shokarev, E. A., Prychyna, E. S., Lehenchenko, V. A., Tytiakova, E. S., Shapoval, V. H., & Andriev, V. S. (2013, January). K voprosu matematicheskogo modelirovaniya osadok fundamentov s pryamougolnoy formoy podoshvyi na gruntovom sloe konechnoy tolschinyi. *Problemy vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii u sferi osvity, nauky ta promyslovosti: tezy dop. Kh mizhnar. konf.* (pp. 69-70). Dnipropetrovsk, Ukraine. URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/58eb6a4e-0142-4d42-b0ac-76ea797fe02f> (in Ukrainian)
6. Shvets, V. B., Shapoval, V. H., Petrenko, V. D., Andreev, V. S., Selykhova, T. A., & Tiutkyn, A. L. (2008). *Fundamenti promyshlennykh, grazhdanskykh i transportnykh sooruzheniy na sloistykh gruntovykh osnovaniyah*: monografiya. Dnepropetrovsk : Novaya ideologiya. (in Ukrainian)
7. Biot, M. A. (1935). Effect of Certain Discontinuities on Pressure Distributions in a Loaded Soil. *Physics*, 6(12), 367-375. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1745279> (in English)
8. Biot, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Physics*, 12(2), 155-164. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1712886> (in English)
9. Shapoval, V., Shashenko, O., Hapiev, S., Khalymendyk, O., & Andriev, V. (2020). Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 91-99. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.01.091> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2025

Прийнята до друку: 30.09.2025

УДК 624.154.5:624.042

О. І. ДУБІНЧИК^{1*}, І. М. ІЛЬНИЦЬКИЙ²^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 566 93 40, ел. пошта ilnitskiy.igor@gmail.com, ORCID 0009-0003-7752-5817**Обґрунтування практичного застосування гвинтової палі зі спіральною лопаттю (геошурупу) під час будівництва пальових фундаментів**

Мета. Метою наукової статті є дослідження практичного застосування гвинтової палі зі спіральною лопаттю (геошурупу) під час будівництва пальових фундаментів, а також практичне застосування принципової методики розрахунку несучої здатності паль даного типу. Аналіз і оцінка розбіжності фактично отриманої несучої здатності паль за результатами випробувань статичними вертикальними навантаженнями у порівнянні з розрахунковими даними. Формування певних висновків щодо опору ґрунту в процесі занурення паль у вигляді тертя по бічній поверхні та рівня такої взаємодії. Оцінка рівня трудомісткості будівельних робіт під час застосування паль зі спіральною лопаттю в будівництві. **Методика.** Наведені матеріали вивчення особливостей конструкцій, що створені на основі реалізованого будівельного проекту з будівництва фундаментів опор повітряних ліній електропередач з застосуванням гвинтових паль зі спіральною лопаттю. Для створення такого об'єкту будівництва з подальшим науковим вивченням особливостей було застосовано розрахункову програму і нормативну документацію з проектування будівельних конструкцій. В результаті було розроблено і проаналізовано альтернативну конструкцію по відношенню до стандартних рішень з будівництва подібних фундаментів, а саме гвинтові палі зі спіральною лопаттю, об'єднані залізобетонним монолітним ростверком. **Результати.** Отримані відповідні дані з несучої здатності паль, дані рівня опору ґрунту на бічній поверхні паль під час їхнього занурення, було перевірено методику теоретичного розрахунку паль натурними випробуваннями на навантаження стиску й висмикування. Було отримано інформацію щодо головних конструктивних і розрахункових складнощів з практичного занурення паль такого типу. Досліджено досвід з'єднання паль і ростверку в одну конструкцію, здатну сприймати значні навантаження і забезпечити надійну основу для надземних конструкцій. **Наукова новизна.** Вперше підтверджено відповідність результатів натурних випробувань та результатів дослідних теоретичних розрахунків несучої здатності паль зі спіральною лопаттю за ґрунтом. **Практична значимість.** Полягає в тому, що на основі вивчення даного досвіду отримано відповіді на досі невідомі питання з розрахунку геошурпів, що, в свою чергу, надає можливість проектувати фундаменти з використанням гвинтових паль зі спіральною лопаттю.

Ключові слова: гвинтова паля зі спіральною лопаттю; фундаменти опор ліній електропередач; геошурупи; несуча здатність палі; конструкція палі; розрахункова схема; теоретичні розрахунки; натурні випробування; опір ґрунту на бічній поверхні

Вступ

Зазвичай у пострадянських країнах для проектування і будівництва фундаментів опор повітряних ліній електропередач (ЛЕП) використовувались конструктивні рішення з використанням типових конструкцій і розрахункових схем без активного залучення новітніх технологічних досягнень і окремих новаторських конструктивних виробів.

Переважно застосовувалися такі конструктивні рішення: окремо стоячі фундаменти на природній основі з плитною частиною і підко-

лонником або пальові фундаменти, які складаються з кушів паль, як правило, по 4...6 штук під кожен з гілок металевої просторової опори. За матеріалами насамперед застосовувалися збірні та збірно-монолітні залізобетонні конструкції з металевими оголовками і елементами кріплення.

Технологічний розвиток призвів до зміни конструктиву практично всіх складових всієї будови опори ЛЕП. По-перше, як наведено на рис. 1, металоконструкція щогли перетворилась з просторової в стрижневу з перерізом у вигляді багатогранника.

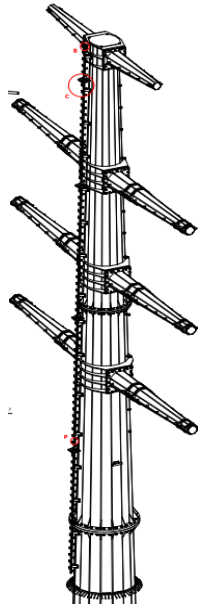


Рис. 1. Вигляд сучасної щогли опори ЛЕП

Fig. 1. View of a modern power line support tower

По-друге, анкерний блок (рис. 2) наразі виконується з великої кількості фундаментних болтів, розташованих по колу, що унеможливає використання збірної варіанту ЛЕП.

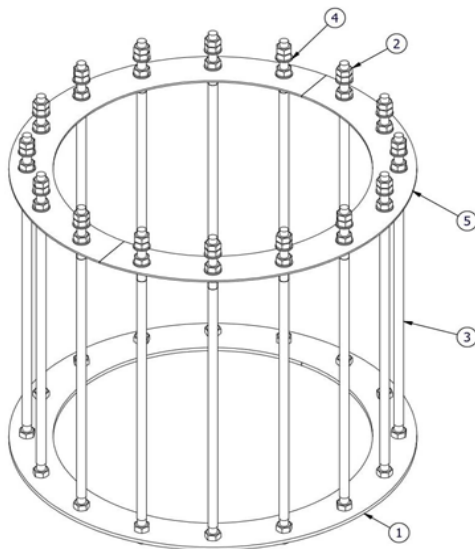


Рис. 2. Вигляд анкерного блоку для кріплення щогли:

- 1 – анкерна пластина; 2 – гайка фундаментного болта;
3 – фундаментний болт; 4 – верхівка болта;
5 – кондуктор зі сталеві пластини

Fig. 2. View of the anchor block for securing the mast:
1 – anchor plate; 2 – foundation bolt nut; 3 – foundation bolt;
4 – bolt head; 5 – steel plate conductor

По-третє, ростверк пального фундаменту або фундамент на природній основі обов'язково повинні бути монолітними, оскільки це єдине рішення у випадку індивідуальних проєктів такого типу. У випадку пального варіанту фундаменту палі можуть бути застосовані забивні або бурові.

Також існують різні види створення несучої основи, наприклад, такі, як зазначено в науковій праці [9], що дає можливість більш глибокого теоретичного аналізу і пропозицій. Ця стаття звертає увагу на застосуванні одного з видів саме гвинтових палей на прикладі реалізованого проєкту.

Для будівництва споруд або конструкцій, які не потребують ретельних розрахунків й призначення яких може бути пов'язано з господарською діяльністю, використовують більш легкі і не такі масивні рішення у порівнянні з класичними палями з залізобетону, а саме гвинтові палі зі спіральною лопаттю – так звані «геошурупи». Такі палі виготовляються переважно з металу і покриваються шаром цинкового покриття. Сфера застосування таких палей – фундаменти стендів сонячних електростанцій, річкових пірсів, конструкції для легких каркасних чи модульних приватних будинків, конструктивні рішення для підсилення фундаментів.

Багато науковців або проєктувальників, які займаються або безпосередньо створенням фундаментних конструкцій, або питаннями розвитку і проблемами фундаментів і основ з виконанням відповідних розрахунків, використовують подібні палі з досягненням певного результату. Але застосування геошурупів під час будівництва конструкцій з значними навантаженнями і високим рівнем відповідальності зустрічається дуже рідко. Цей факт, по-перше, пояснюється деякими відомими причинами: корозія металу в ґрунті, невеликі габарити і, як наслідок, відносно невисока міцність окремо взятої палі, але, по-друге, через те, що немає достатнього досвіду в розрахунках та випробуваннях геошурупів по ґрунту, а в офіційній нормативній документації безпосередньо про геошурупи мова взагалі не йде.

В даній статті нами буде наведено реальний приклад можливості поєднання роботи двох, на перший погляд, несумісних конструктивів фундаменту – багатогвинтових металевих палей зі

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

спіральною лопаттю й монолітного залізобетонного ростверку на прикладі проектування і подальшого будівництва фундаменту опори ЛЕП. Буде розглянуто несучу здатність геошурупів і застосування методики її розрахунку, яка була вивчена в статті [6]. Також будуть розглянуті принципи переваги і недоліки на прикладі наведених рішень, а також складності, з якими довелося зіштовхнутися учасникам проекту.

Мета

Метою наукової статті є дослідження практичного застосування гвинтової палі зі спіральною безперервною лопаттю (геошуруп) під час будівництва пальових фундаментів, а також практичне застосування принципової методики розрахунку несучої здатності паль даного типу.

Планується виконати: аналіз і оцінку розбіжності фактично отриманої несучої здатності паль за результатами випробувань статичними вертикальними навантаженнями у порівнянні з розрахунковими даними; формування певних висновків щодо опору ґрунту в процесі занурення паль у вигляді тертя по бічній поверхні та рівня такої взаємодії; оцінку можливості застосування подібних конструкцій в цілому, а також оцінку рівня трудомісткості будівельних робіт під час застосування паль зі спіральною лопаттю в будівництві.

Методика

Будівництво відбувалось безпосередньо на місці розташування існуючої опори в ході реконструкції лінії зі збільшенням її потужності. Взагалі весь проект по реконструкції лінії передбачав заміну як самої опори, так і фундаменту. Потрібно було здійснити заміну існуючої металеві просторової конструкції на нову металеву щоглу у вигляді стрижня з перерізом у вигляді багатогранника (див. рис. 1), а також побудувати новий фундамент замість існуючого.

Загалом в процесі проектування і будівництва виникла необхідність розробки альтернативного рішення щодо конструкції фундаменту через дуже короткий ліміт часу знеструмлення діючої лінії на будівельні роботи по заміні фундаментів і опори в цілому, через що підрядник не встигав завершити будівельно-монтажні ро-

боти в повному обсязі. В процесі проектування було запропоновано застосувати геошурупи в якості паль через те, що вони є малогабаритними виробами і не потребують залучення великих механізмів, тобто їх занурення можливо здійснювати під час роботи існуючої лінії без втручання в існуючу металеву опору. Розташування паль було запропоновано здійснити таким чином, щоб вони знаходились між елементами існуючого фундаменту, через що форма монолітного залізобетонного ростверку набула характерної геометричної форми в плані, а саме хреста. Дякуючи такому нестандартному рішенню, будівництво фундаменту і набір міцності бетону відбувалися без необхідності знеструмлення лінії, а подальша заміна металеві опори і встановлення дротів самої лінії вже здійснювалась в рамках ліміту часу на знеструмлення.

В класичному будівельному рішенні спочатку довелося б демонтувати існуючі елементи опори і фундаменту, потім побудувати новий фундамент і дочекатися набору міцності бетону, тільки після цього стало б можливе здійснити монтаж нової опори і дротів, що було неможливе в ліміті відведеного на це часу.

Загалом було застосовано наступне рішення для реконструкції декількох існуючих опор з пальовими фундаментами і варіанту окремого фундаменту на природній основі, тому надалі фотоматеріали та креслення будуть наводитись, виходячи з хронології реконструкції цих двох випадків. Розглянемо всі складові зазначеного рішення.

В якості паль було застосовано багатогвинтові палі (геошурупи), які є стрижнями круглого перетину з влаштуванням на зовнішній поверхні безперервної лопаті у вигляді спіралі. Діаметр паль змінного перетину коливається з 76 мм до 108 мм, вони виготовлені з металеві труби відповідного діаметру і товщиною стінки 4 мм. Спіральна лопать має ширину 15 мм з товщиною металу 1,5 мм. Загальна довжина палі складає 6 м. Оголовок палі оснащується трьома пластинами товщиною по 10 мм з відповідними отворами для кріплення під час занурення. Для елементів геошурупів використана марка сталі С245. Зовнішнє антикорозійне цинкове покриття виконано товщиною не менше 80 мкм і не більше 200 мкм, нанесення цього покриття від-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

бувалося методом гарячого цинкування в суворому дотриманні норм на виконання таких робіт.

На рис. 3 детально зображено конструкцію палі, яка була застосована в робочому проекті і будівництві.

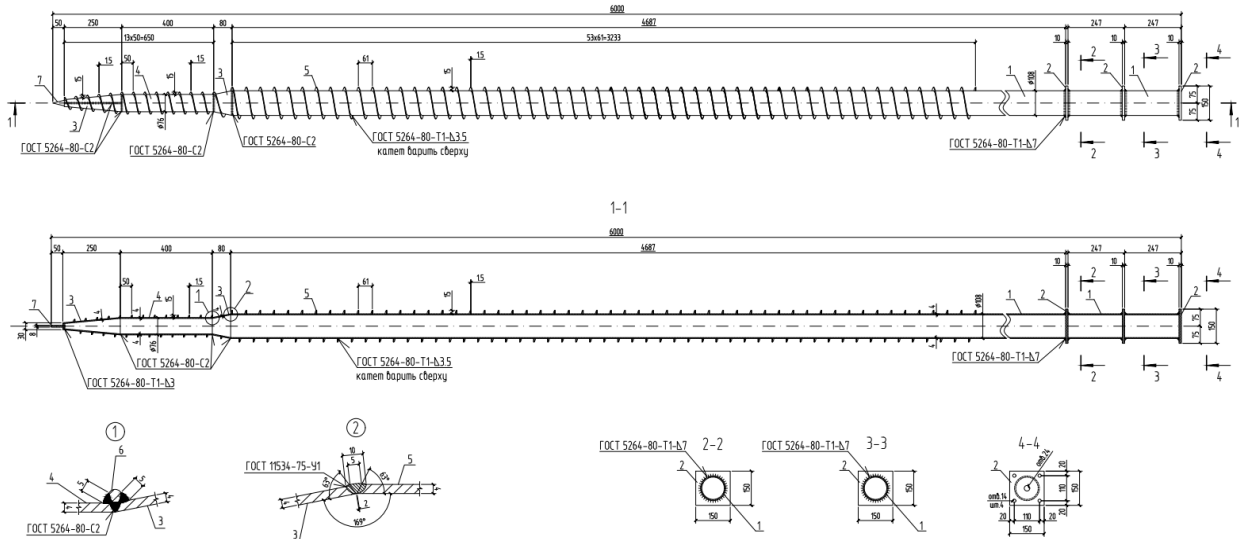


Рис. 3. Багатогвинтова палія зі спіральною лопаттю (геошуруп)

Fig. 3. Multi-screw pile with spiral blade (geo-screw)

Всі матеріали для конструкцій і з'єднань відповідають вимогам чинних норм [5].

Занурення палей відбувалося в пісок щільний і середньої щільності з поверхні попередньо викопаного котловану між фундаментами існуючої опори. Характеристики ґрунтів наступні (надано інженерно-геологічні елементи, ІГЕ):

ІГЕ 4а – пісок м'який, кварцовий, жовто-сірий, сірий, середньої щільності з прошарками пухкого, малого та середнього ступеню водонасичення з наступними розрахунковими характеристиками: модуль деформації $E = 2\,650\text{ т/м}^2$; об'ємна вага $\gamma = 1,79\text{ т/м}^3$; питоме зчеплення по бічній поверхні $C = 0,1\text{ т/м}^2$; кут внутрішнього тертя $\varphi = 27^\circ$; коефіцієнт пористості $e = 0,65$.

ІГЕ 5а – пісок середньої крупності, кварцовий, сірий, щільний, з прошарками середньої щільності, насичений водою з наступними розрахунковими характеристиками: модуль деформації $E = 3\,058\text{ т/м}^2$; об'ємна вага $\gamma = 1,91\text{ т/м}^3$;

питоме зчеплення по бічній поверхні $C = 0,1\text{ т/м}^2$; кут внутрішнього тертя $\varphi = 29^\circ$; коефіцієнт пористості $e = 0,54$.

На рис. 4 відображено геологічний розріз з реальними габаритами всієї конструкції.

Ростверк виконано з монолітного залізобетону, він має жорстке з'єднання з оголовками палей і відповідне армування. Також в конструкції ростверку передбачено закладний блок анкерних болтів, що, в свою чергу, обумовлює рішення щодо монолітної конструкції ростверку, а також наявність підколонника квадратного перетину в плані. Як вказано вище, плитна частина ростверку виконується у вигляді хреста в плані, що обумовлено розташуванням палей. Клас бетону за міцністю – С20/25, армокаркаси виконано в'язаними з окремих стрижнів класу міцності А400С для поздовжнього армування і А240С для поперечного.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

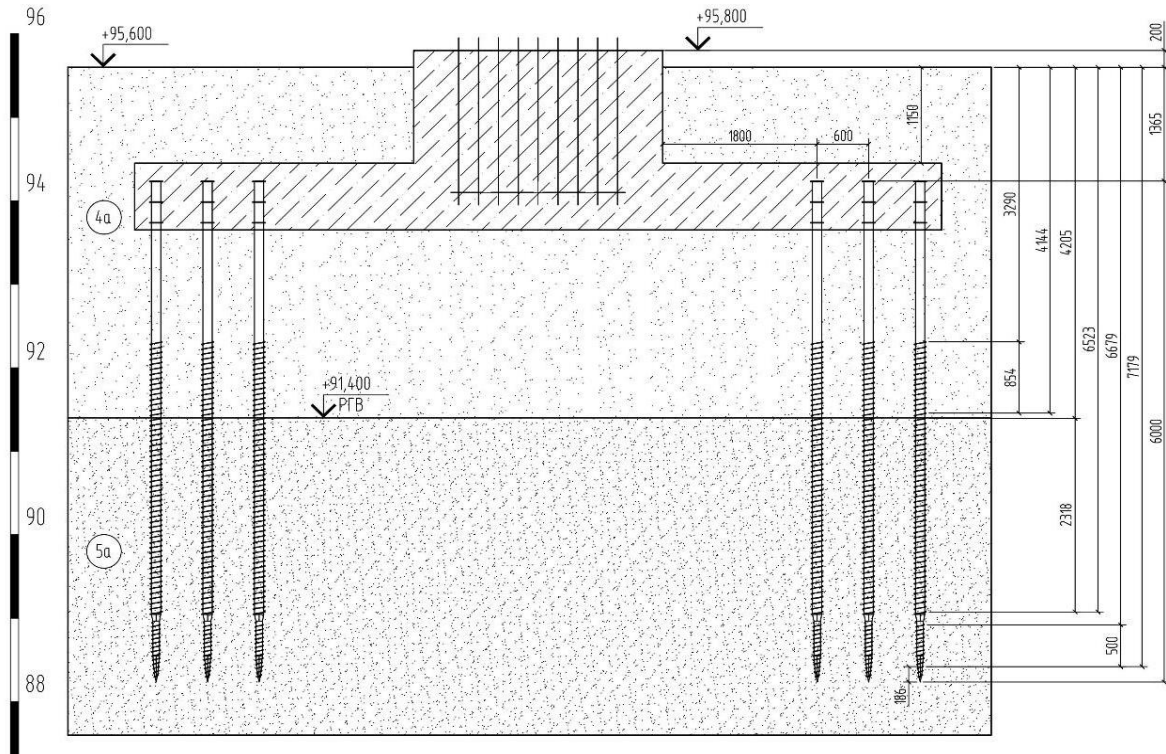


Рис. 4. Геологічний розріз у місці пальового фундаменту

Fig. 4. Geological section at the pile foundation site

З точки зору просторової жорсткості і стійкості конструктивного рішення прийнято, що з'єднання паль з ростверком є жорстким за рахунок заведення оголовку палі в тіло ростверку на відповідну глибину, з'єднання щогли з ростверком є жорстким за рахунок відповідного

влаштування в армокаркас ростверку анкерного блоку, палі в ґрунті працюють як висячі з оточенням однорідним лінійно-деформованим півпростором у вигляді ґрунту.

На рис. 5 зображено поперечний розріз монолітного ростверку з армуванням.

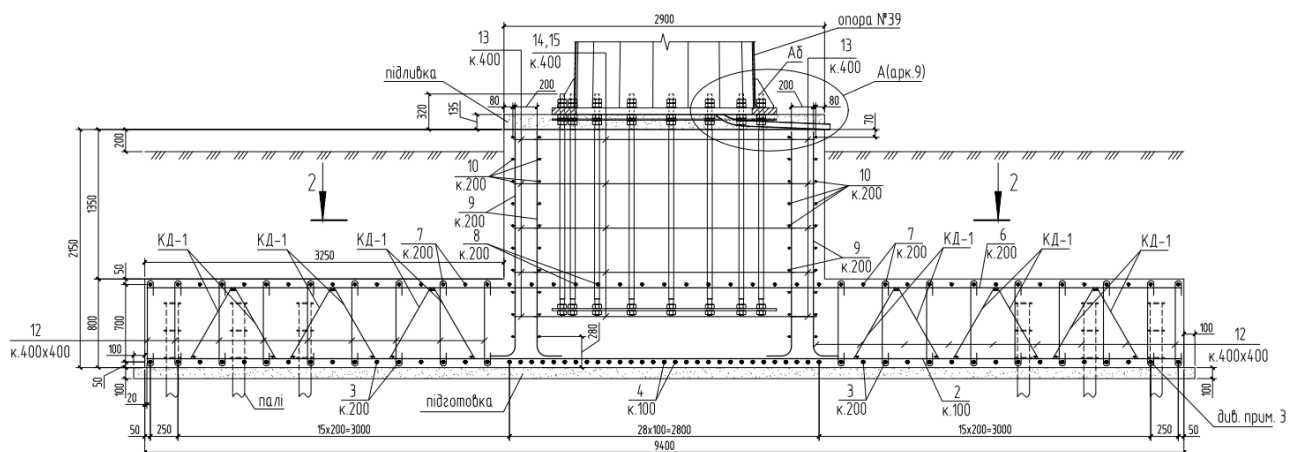


Рис. 5. Монолітний ростверк в розрізі

Fig. 5. Monolithic grillage in cross section

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Розрахунок просторової моделі, зображення якої наведено на рис. 6, виконувався за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР [1], з моделюванням всіх складових фундаменту скінченними елементами різного типу. Окремо треба зазначити, що під час проектування споруд такого типу є певні нормативні обмеження щодо граничних деформацій за креном і осі-

данними фундаменту, тому при створенні розрахункової моделі довелося моделювати податливість паль у ґрунті як в горизонтальній [7, 8], так і вертикальній площинах і таким чином контролювати і підбирати певне розташування паль відносно центру прикладання зусиль.

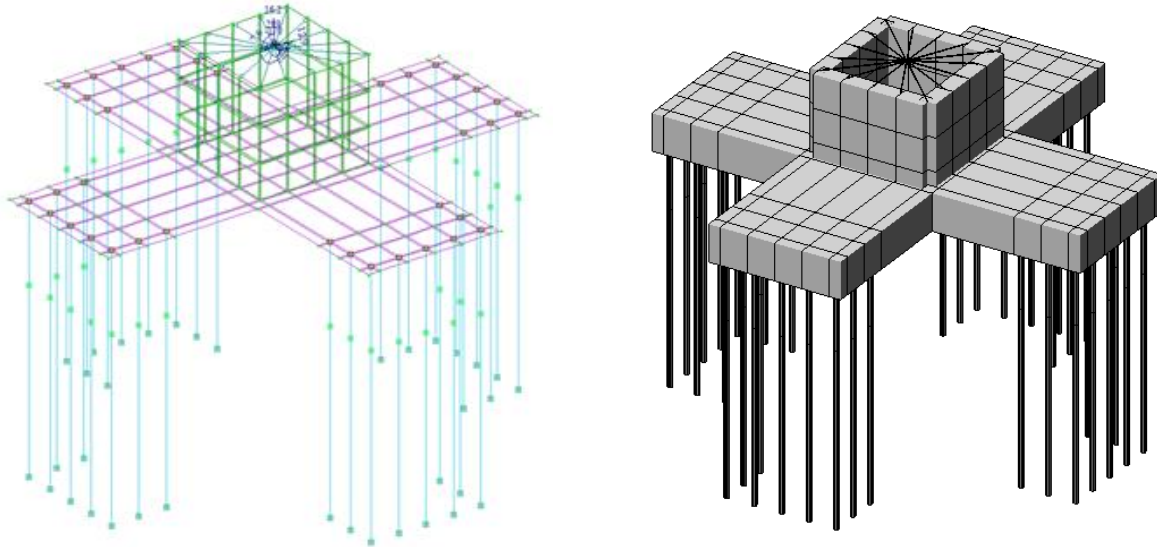


Рис. 6. Розрахункова просторова модель фундаменту

Fig. 6. Calculated spatial model of the foundation

несуча здатність геосурупів була визначена за методикою, яка була детально наведена в статті [6], з урахуванням висновків статті

$$Fd = \sin 79^\circ \cdot \sum [\gamma c \cdot (\alpha 1 \cdot C1 + \alpha 2 \cdot \gamma 1 \cdot h1) \cdot A] + \gamma c \cdot U \cdot f_i \cdot (H_i - d),$$

де $\gamma c = 0,7$, $\gamma c = 0,6$, $\gamma c = 0,5$ – коефіцієнт умов роботи відповідно для навантажень стиску й висмикування.

Для ІГЕ 4а: $\varphi = 27^\circ$ – кут внутрішнього тертя ґрунту; $\alpha 1 = 26,3$, $\alpha 2 = 14,4$ – безрозмірні коефіцієнти; $C1 = 0,1 \text{ т/м}^2$ – питоме зчеплення з бокової поверхні; $\gamma 1 = 1,79 \text{ т/м}^3$ – середнє значення питомої ваги ґрунту, що залягає вище лопаті палі; $h1$ = змінне за кресленнями палі в м – глибина залягання лопаті палі від природного рельєфу, а при плануванні території зрізанням – від рівня планування; $A = 0,0058$ і $0,0043 \text{ м}^2$ – проекція площі лопаті за вирахуванням площі перерізу стовбура палі; $U = 0,34 \text{ м}$ – периметр ствола палі; $r_i = 3,4 \text{ тнс/м}^2$ – розрахунковий опір ґрунту по біч-

[10], а також розрахункових значень, відповідних місцевим ґрунтовим умовам, а саме:

ній поверхні стовбура палі; $H_i = 0 \text{ м}$ – довжина стовбура палі, зануреної у ґрунт; $d = 0,106$ і $0,138 \text{ м}$ – діаметр лопаті палі.

Для ІГЕ 5а: $\alpha 1 = 33,75$, $\alpha 2 = 19,5$ – безрозмірні коефіцієнти; $\varphi = 29^\circ$ – кут внутрішнього тертя ґрунту; $C1 = 0,1 \text{ т/м}^2$ – питоме зчеплення з бокової поверхні; $\gamma 1 = 1,79 \text{ т/м}^3$ – середнє значення питомої ваги ґрунту, що залягає вище лопаті палі; $h1$ = змінне за кресленнями палі в м – глибина залягання лопаті палі від природного рельєфу, а при плануванні території зрізанням – від рівня планування; $A = 0,0058$ і $0,0043 \text{ м}^2$ – проекція площі лопаті за вирахуванням площі перерізу стовбура палі; $U = 0,34 \text{ м}$ – периметр ствола палі; $r_i = 4,1 \text{ тнс/м}^2$ – розрахунковий опір ґрунту по

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

бічній поверхні стовбура палі; $H_i = 0$ м – довжина стовбура палі, зануреної у ґрунт; $d = 0,106$ і $0,138$ м – діаметр лопаті палі.

Питома вага ґрунту з урахуванням зважування дії води визначена за формулою

$$(\gamma_s - \gamma_w) / (1 + e) =$$

$$(2.65 - 1) / (1 + 0.54) = 1.07 \text{ м}^3;$$

де $\gamma_s = 2,65 \text{ т/м}^3$ – щільність частинок ґрунту; $\gamma_w = 1,00 \text{ т/м}^3$ – щільність води; $e = 0,54$ – коефіцієнт пористості.

Навантаження моделей фундаменту виконувалось згідно з вимогами [2]. Нагадаємо також,

що головна формула цих розрахунків базується на обчисленні, наведеному в документі [3].

Допустиме розрахункове вертикальне навантаження, що буде дозволено прикладати на кожну із паль за результатами розрахунків склало 23 т на стиск і 15,3 т на висмикування.

Результати

Випробування паль. Головний результат, від якого залежала можливість реалізації проекту, отримано під час випробування паль на навантаження стиску й висмикування. Отже, для отримання результуючих даних фактичної несучої здатності палі, були виконані випробування палі за схемою (рис. 7) на майданчику в ґрунтових умовах, які були наведені вище.

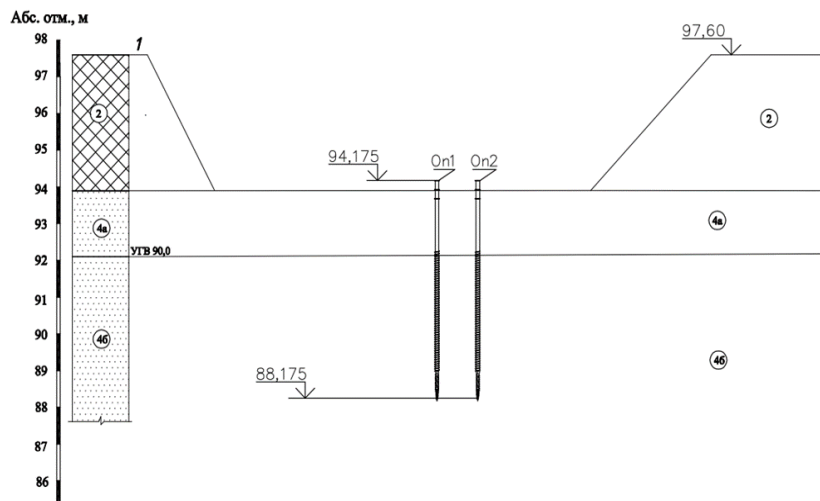


Рис. 7. Схема випробувальних паль

Fig. 7. Test pile diagram

Випробування статичними осьовими навантаженнями вдавлювання відбувалося в ґрунтах природної вологості. Навантаження гвинтової палі статичним осьовим навантаженням здійснювалося ступенями по 26 кН (перші три ступені навантаження – 52,0 кН) за допомогою гідравлічного домкрата ДГО–50, який встановлювався на палю і упирився в опорний стеліт, закріплений на 4-х анкерних палях.

Випробування статичними осьовими навантаженнями висмикування відбувалося в ґрунтах природної вологості. Навантаження гвинтової палі статичним осьовим навантаженням висмикування здійснювалося ступенями по 16,0 кН (перші три ступені навантаження – 32 кН) за допомогою гідравлічного домкрата

ДГО–50, який встановлювався на інвентарний стеліт із обпиранням на місцевий ґрунт.

Навантаження на палю визначалося за манометром з відповідним перерахуванням його показань тиску (кгс/см^2) на навантаження (кН).

Осідання палі при випробуванні фіксувалися з точністю 0,01 мм двома прогиномірами типу 6ПАТ, встановлених на реперних пристроях. Результати спостережень заносилися до журналу статичних випробувань палі, за даними яких побудований графік залежності осідання палі або виходу оголовка палі від навантаження $S = f(p)$ та графік зміни переміщення палі у часі ступенями навантаження $S = f(t)$ (рис. 8 і 9).

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

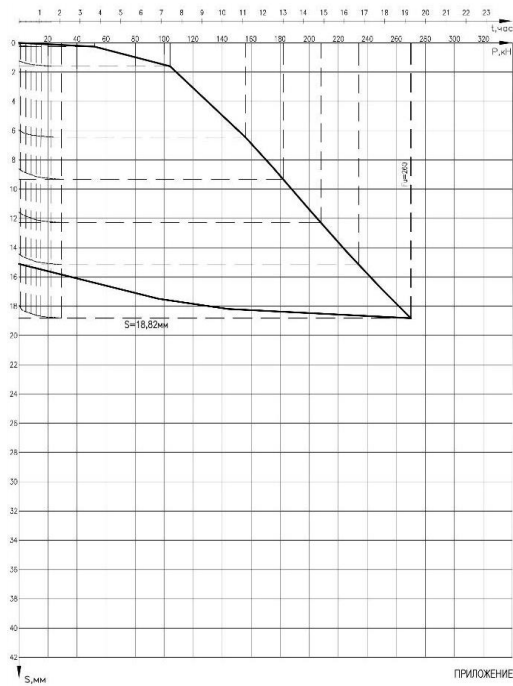


Рис. 8. Графік залежності осідання палі від навантаження вдавлювання та від часу

Fig. 8. Graph showing the dependence of pile settlement on the driving load and time

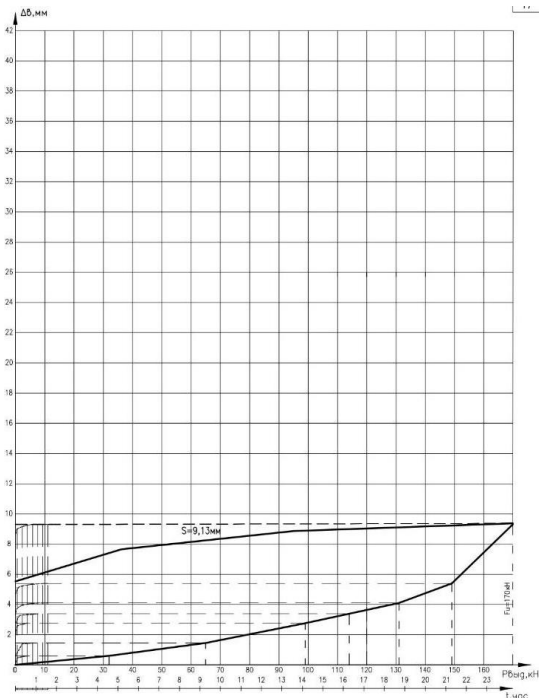


Рис. 9. Графік залежності виходу оголовка палі від навантаження висмикування та від часу

Fig. 9. Graph showing the dependence of pile head yield on pull-out load and time

Таким чином за результатами випробувань палі було отримано значення дозволеного розрахункового навантаження стиску (вдавлювання) й висмикування, які дорівнюють:

$$N(\text{стиск}) = F_d * \gamma_k = 27 / 1,2 = 22,5 \text{ тн};$$

$N(\text{висмикування}) = F_d * \gamma_k = 17 / 1,2 = 14,1 \text{ тн}$, де коефіцієнт надійності $\gamma_k = 1,2$ згідно п. 8.5.2.24 за ДБН В.2.1–10–2018 зм.1 [3].

За отриманими результатами було доведено, що несуча здатність палі, по-перше, достатньо висока для того, щоб використовувати геошпунти для подібних конструктивних рішень, а, по-друге, відповідає результатам розрахунків і відповідно можна виконувати подальше будівництво фундаментів за розробленим робочим проектом.

Складнощі занурення. Всі палі вдалося занурити на проектну глибину, але в процесі виконання робіт будівельникам довелося зіштовхнутися з однією проблемою, а саме: оголовок палі за 20...50 см до проектної відмітки починав скручуватись через те, що металева труба починала втрачати стійкість (характерна картина показана на рис. 10). З'ясувалось, що для труби 108×4 мм в даних ґрунтових умовах глибина занурення 5,5 м – це гранична глибина, на яку можливо занурити палі такої конструкції з таким діаметром.



Рис. 10. Втрата стійкості оголовка палі під час занурення

Fig. 10. Loss of stability of the pile cap during immersion

Під час занурення палі на початковому етапі до глибини 5 м всі палі працювали без заважаєнь, але останні 0,5 метра в рівні оголовка

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

палі дуже помітно було скручування металу і деформація верхніх фланців відносно один одного. Причиною цього стали два фактори.

Перший – це конструктивне питання, яке полягало в тому, що оголовок палі було оснащено трьома фланцями для забезпечення жорсткого закріплення оголовка палі в тілі ростверку, але безпосередньо фланці кріпилися до стовбура палі за допомогою зварювання, яке було виконане перпендикулярно до поздовжньої осі палі та по факту виконувалась напівавтоматичним способом, тому матеріал оголовка палі був дещо послаблений у відношенні до стійкості зі скручування. Це питання вдалося вирішити за допомогою конструктивного рішення з підсилення оголовка палі додатковим пластинами з приварюванням до фланців (рис. 11).



Рис. 11. Підсилення оголовків палей

Fig. 11. Reinforcement of pile caps

Другий фактор – це питання самого напруження в тілі труби оголовка, через те, що в оголовку палі концентрується найвище напруження від скручування, яке формується по всій довжині стовбура палі через тертя її зовнішньої поверхні і спіральної лопаті з частками ґрунту, що її оточує. Справа полягає в тому, що в нормативній документації відсутні дані для розрахунків величини моменту на скручування від дії бічного тертя поверхні палі з оточуючим ґрунтом при зануренні палі методом закручування. Ті дані, які наведені в нормативній документації, зокрема в додатку Н за ДБН В.2.1–10–2018 зм. 1 [3], для визначення попередньої несучої здатності палі в ґрунті за рахунок тертя бічної поверхні з ґрунтом, дуже малі для такого розрахунку і не відображають реального рівня напруження, яке виникає в процесі занурення геозурупів.

Було підраховано, що величина моменту скручування оголовка палі в зазначених вище умовах сягала рівня 21...26 кН·м. Це напруження виникало в рівні кріплення палі до робочого органу з обертання палі, тобто в найвищій точці оголовка палі.

Таким чином, можна свідчити, що якби палі мала довжину до 7 м і її занурення потребувало б ще одного метра, то напевно б довелося збільшувати товщину стінки труби або підбирати новий переріз палі й змінювати технологічну лінійку на виробництві. Але завдяки цьому досвіду стало можливим попередньо визначити і дослідити більш-менш дійсні величини опору ґрунту на бічній поверхні палі під час занурення методом закручування. Це питання буде детально розглянуто в наступній публікації.

З'єднання з ростверком, технічний результат в цілому. У питанні з'єднання палі такої конструкції з монолітним ростверком несподіваних питань чи проблем не виникало. Можна тільки зазначити про набуття позитивного досвіду з точки зору виконання будівельних робіт і конструювання в проектній документації палі такого типу.

З'єднання палі з монолітною конструкцією з метою забезпечення сумісної роботи конструкції фундаменту в цілому відбулося, по-перше, за рахунок конструкції самої палі, зокрема влаштування фланців в рівні оголовка палі, а, по-друге, в армокаркасі ростверку було передбачено відповідне армування, яке дозволило долучити палі до конструкції ростверку і забезпечило передачу зусиль від щогли через тіло ростверку на палі.

Фланці були приварені до оголовків палі і забезпечили з'єднання з бетоном ростверку, що дозволило сприймати вертикальні, тобто повздовжні для палі зусилля від щогли.

Діаметр палі, який дорівнює 108 мм ззовні, дозволив без перешкод втілити проектні рішення щодо влаштування арматурного каркасу, який в свою чергу складався з окремих стрижнів і в'язався на будівельному майданчику (рис. 12 і 13). Обсяги робіт по влаштуванню і будівництву фундаменту в цілому зменшилися у порівнянні з випадками застосування класичних конструктивних рішень з влаштування подібних конструкцій (рис. 14).



Рис. 12. Розміщення паль відносно нижньої сітки армокаркасу

Fig. 12. Placement of piles to the lower mesh of the reinforcement cage



Рис. 13. Розміщення паль в тілі просторового армокаркасу в цілому

Fig. 13. Placement of piles in the body of the spatial reinforced frame as a whole



Рис. 14. Масштаби будівельних робіт для різних рішень

Fig. 14. Scale of construction work for different solutions

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна виконаної роботи полягає у тому, що вперше підтверджено відповідність результатів натурних випробувань та результатів теоретичних розрахунків несучої здатності паль зі спіральною безперервною лопаттю за ґрунтом з подальшим використанням в конструкції фундаменту.

Практична значимість полягає в тому, що стає можливим проектування фундаментних споруд з використанням геошурупів, а також стає можливим проектування безпосередньо самих паль з розумінням механіки їх роботи в процесі занурення і експлуатації.

Ця робота є першим змістовним прикладом повноцінного використання багатогвинтових паль зі спіральною лопаттю не просто як ідеї, а реального об'єкту проектування і будівництва пального фундаменту відповідальної споруди з досягненням високих показників міцності, стійкості і несучої здатності.

Висновки

На сьогоднішній день ще не розроблено типових рішень або навіть нормативних пропозицій для застосування подібного конструктивного рішення для проектування і спорудження фундаментних будов різних будівель і споруд через те, що цей напрямок має початковий рівень розвитку, звідси стає доречним зробити

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

висновок про створення багатьох індивідуальних рішень для кожного окремого випадку в будівництві.

Наведений приклад реалізації такого рішення показав, що це цілком робоча схема і, навіть базуючись тільки на цьому прикладі, стає можливим сформулювати певні висновки і подальшу перспективу застосування такого напрямку в проектуванні і будівництві пальових фундаментів із застосування багатогвинтових паль зі спіральною лопаттю (геошурупів):

– за результатами польових випробувань ґрунтів палями такого типу на навантаження стиску й висмикування були отримані достатньо високі показники несучої здатності конструкції гвинтових паль зі спіральною лопаттю, що дає обґрунтовану підставу враховувати лопать в роботі висячих паль замість того, щоб вважати її дрібною нерівністю на поверхні палі або пристосуванням виключно для занурення самої палі;

– результати польових випробувань ґрунтів палями збіглися з теоретичними розрахунками, тому це позитивно з точки зору розрахунків фундаментів в цілому і надає можливість взагалі проектувати такі конструкції, застосовуючи їх ще до отримання натурних випробувань;

– завдяки цьому досвіду було виявлено, що занурення паль даного типу шляхом укручування дуже складне і відповідальне питання через силу тертя бічної поверхні палі з ґрунтом,

яке потребує досліджень з виводом правил відповідних розрахунків;

– з точки зору виконання будівельних робіт застосування саме такого типу паль дуже сильно впливає на терміни їх занурення, які виявились значно менші у порівнянні з забивними чи буровими палями, а механізми, що залучені для занурення геошурупів, значно менш масивні і дешевші у порівнянні з механізмами по зануренню забивних або бурових паль.

Одним з найважливіших питань щодо можливості застосування таких паль в складі капітальних конструкцій є те, що вони зроблені з металу з нанесенням гарячого цинкового покриття. Розрахунковий термін експлуатації паль згідно ДСТУ Б В.2.6–193 додатком К [5] складає не менше 40 років. По закінченню цього терміну допускається продовження терміну служби паль після контрольного заміру товщини і візуального огляду цинкового покриття.

Поєднання конструктивних рішень різного формату дає досить ефективний кінцевий результат, особливо зважаючи на потреби та виклики у сучасному будівництві.

З точки зору швидкості та простоти будівельних робіт по влаштуванню пальового поля, застосування багатогвинтових паль зі спіральною лопаттю (геошурупів) дають значну перевагу у порівнянні зі звичайними видами паль, такими як забивні та бурові.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барабаш М. С., Сорока М. М., Сур'янінов М. Г. *Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра-САПР* : монографія. Київ : Екологія, 2018. 248 с.
2. *ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2.* [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 11 с.
3. *ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення.* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 42 с.
4. *ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1.* [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 18 с.
5. *ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії.* Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 32 с.
6. Дубінчик О. І., Ільницький І. М. Методика розрахунку несучої здатності гвинтової палі зі спіральною лопаттю за ґрунтом. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика.* 2024. № 25. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303293>
7. Khidri M., Deng L. Field Lateral Behaviour of Full-Scale Screw Micropiles in Cohesive and Cohesionless Soils. *Geotechnical and Geological Engineering.* 2024. Vol. 42. P. 3711–3730. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02753-0>
8. Khidri M., Liu C., Deng L. Numerical Analysis of Screw Micropiles Under Lateral Loads via BNWF Method. *Geotechnical and Geological Engineering.* 2025. Vol. 43, Iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-024-03051-5>

9. Petrenko V., Bannikov D., Kharchenko V., Tkach T. Regularities of the deformed state of the geotechnical system «soil base – micropile». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Article 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028>
10. Soltani-Jigheh H., Zahedi P. Load Transfer Mechanism of Screw Piles in Sandy Soils. *Indian Geotech Journal*. 2020. Vol. 50. P. 871–879. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00431-5>

O. I. DUBINCHYK^{1*}, I. M. ILNYTSKYI²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 582 14 88, e-mail o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 566 93 40, e-mail ilnitskiy.igor@gmail.com, ORCID 0009-0003-7752-5817

The Latest Technologies in the Development and Practical Application of Helical Blade Screw Piles in Construction

Purpose. The purpose of the scientific article is to study the practical application of a screw pile with a spiral blade (geoscrew) in the construction of pile foundations, as well as the practical application of the principle methodology for calculating the bearing capacity of piles of this type. Analysis and assessment of the discrepancy between the actually obtained bearing capacity of piles based on the results of tests with static vertical loads in comparison with the calculated data. Experiment and creation of certain conclusions regarding the resistance of the soil in the process of immersion of piles in the form of friction on the lateral surface, the formation of certain conclusions regarding the level of such friction. Assessment of the level of labor intensity of construction work when using piles with a spiral blade in construction. **Methodology.** The materials presented for studying the features of structures are created on the basis of an implemented construction project for the construction of foundations for overhead power line supports using screw piles with a spiral blade. To create such a construction object with further scientific study of the features, research program and regulatory documentation for the design of building structures were used. As a result, an alternative design was developed and analyzed in relation to standard solutions for the construction of such foundations, namely screw piles with a spiral blade, combined with a reinforced concrete monolithic grillage. **Findings.** Results. The relevant data on the bearing capacity of piles were obtained, data on the level of soil resistance on the lateral surface of piles during their immersion, the methodology for theoretical calculation of piles was verified by full-scale tests for compressive and pulling loads. Information was obtained on the main design and calculation difficulties in the practical immersion of piles of this type. The experience of combining piles and grillage into one structure capable of taking on large loads and providing a reliable foundation for above-ground structures was studied. **Originality.** First, the correspondence of the results of field tests and the results of experimental theoretical calculations of the bearing capacity of piles with a spiral blade against the soil was confirmed. **Practical value.** It consists in the fact that on the basis of the study of this experience, answers to previously unknown questions on the calculation of geoscrews were obtained, which in turn makes it possible to design foundations using screw piles with a spiral blade.

Keywords: screw pile with a spiral blade; foundations of power transmission line supports; geoscrews; bearing capacity of pile; pile design; calculation scheme; theoretical calculations; field tests; soil resistance on the lateral surface

REFERENCES

1. Barabash, M. S., Soroka, M. M., & Surianinov, M. G. (2018). *Neliniina budivelna mekhanika z PK Lira-SAPR*. Kyiv: Ecology. (in Ukrainian)
2. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantagenia I vplyvi. Normi proektuvania, 11 DBN V.1.2-2:2006*. (2006). (in Ukrainian)
3. *Osnovy ta fundamenty budivel ta sporud, 42 ДБН В.2.1-10:2018*. (2018). (in Ukrainian)
4. *Stalevi konstruktsiji. Normi proektuvanja, 18 DBN V.2.6-198:2014*. (2014). (in Ukrainian)
5. *Zakhyst metalhevykh konstruktsii vid korozii [Protection of metal structures against corrosion], 32 DSTU B V.2.6-193:2013*. (2013). (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

6. Dubinchyk, O. I., & Ilnytskyi, I. M. (2024). Methodology for calculating the bearing capacity of a screw pile with a helical blade in soil. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, (25), 53-64.
DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2024/303293> (in Ukrainian)
7. Khidri, M., & Deng, L. (2024). Field Lateral Behaviour of Full-Scale Screw Micropiles in Cohesive and Cohesionless Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, (42), 3711-3730.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02753-0> (in English)
8. Khidri, M., Liu, C., & Deng, L. (2025). Numerical Analysis of Screw Micropiles Under Lateral Loads via BNWF Method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(2).
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-024-03051-5> (in English)
9. Petrenko, V., Bannikov, D., Kharchenko, V., & Tkach, T. (2022). Regularities of the deformed state of the geotechnical system «soil base – micropile». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028> (in English)
10. Soltani-Jigheh, H., & Zahedi, P. (2020). Load Transfer Mechanism of Screw Piles in Sandy Soils. *Indian Geotech Journal*, 50, 871-879. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00431-5> (in English)

Надійшла до редколегії: 15.05.2025

Прийнята до друку: 18.09.2025

УДК [656.13:620.1]-027.45

В. Є. ОЛШЕВСЬКА^{1*}, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ², Г. П. ІВАНОВА³

^{1*}Каф. автомобілів та автомобільного господарства, 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

Металеві конструкційні матеріали для виробництва і ремонту деталей автомобілів: практика та перспективи

Мета. Основною метою роботи є огляд і систематизація металевих конструкційних матеріалів для виробництва і ремонту деталей автомобілів, а також аналіз сучасних тенденцій їх подальшого розвитку. **Методика.** До основних проблем, які сьогодні пов'язані з металевими конструкційними матеріалами, можна віднести наступні: висока густина матеріалів, внаслідок чого збільшується маса автомобіля; витрати паливно-мастильних матеріалів і кількість шкідливих викидів в атмосферу; потреба забезпечення міцності і надійності автомобільних конструкцій; потреба забезпечення пасивної і активної безпеки; схильність матеріалів до корозії, про масштаби якої дозволяє судити той факт, що приблизно 20 % одержуваної у світі сталі йде на покриття втрат від корозії; задача зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище; розробка нових матеріалів, які задовольняють сучасним вимогам; вибір та обґрунтування конструкційних матеріалів для деталей автомобілів; підготовка до повоєнної відбудови, потреба економії ресурсів. 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 ударну в'язкість). **Результати.** Проаналізовано сучасний стан та проблеми, що пов'язані з металевими конструкційними матеріалами; показано, що конструкційні матеріали суттєво впливають на масу автомобіля, міцність, надійність, корозійну стійкість, витрати паливно-мастильних матеріалів і кількість шкідливих викидів в атмосферу. Проведений аналіз конструкційних вуглецевих сталей дозволяє коректно формулювати вимоги, що пред'являються до сталей певних груп автомобільних деталей, і виконувати вибір матеріалів для виготовлення або ремонту деталей автомобілів з урахуванням властивостей матеріалу, призначення та умов роботи автомобільних деталей. Розглянуто сучасні тенденції розробки нових матеріалів на автомобільному транспорті: високоміцних сталей, алюмінієвих сплавів, наноматеріалів, композиційних матеріалів. Досліджено можливості створення шаруватих композиційних матеріалів зварюванням вибухом, проведено випробування на ударну в'язкість. **Наукова новизна.** Проведено комплексний аналіз проблем металевих конструкційних матеріалів, що дозволяє виявити їхній вплив на масу автомобіля, витрати паливно-мастильних матеріалів і кількість шкідливих викидів в атмосферу. Виділено основні тенденції розвитку металевих конструкційних матеріалів; розглянуто підхід до оцінки матеріалів за критерієм втленої енергії. Акцентовано увагу, що розвиток інноваційних технологій створення нових металевих конструкційних матеріалів є важливим кроком до переходу на екологічно чистий транспорт в країні. Обґрунтовано використання шаруватих металевих композиційних матеріалів в якості матеріалів з високою в'язкістю руйнування. **Практична значимість.** Проведено аналіз основних марок конструкційних вуглецевих сталей, який дозволяє коректно формулювати вимоги, що висуваються до сталей певних груп автомобільних деталей, а також виконувати вибір матеріалів для виготовлення та ремонту деталей автомобілів з урахуванням властивостей сталей й призначення та умов роботи деталей автомобіля. Виділено напрями та проблеми металевих конструкційних матеріалів для деталей автомобілів. Запропоновано шаруваті металеві композиційні матеріали, отримані зварюванням вибухом, в якості матеріалів з високою в'язкістю руйнування.

Ключові слова: сталі; композиційні матеріали; класифікація матеріалів; міцність; ударна в'язкість; автомобільні деталі

Вступ

Автомобільний транспорт виконує важливу роль у функціонуванні та розвитку економіки будь-якої країни [22].

В Україні автомобільний транспорт забезпечує більше половини обсягу пасажирських перевезень і три чверті вантажних перевезень [14].

Використання автомобільного транспорту в Україні має свої особливості [14]:

- швидке зростання рівня автомобілізації;
- технічна та (або) моральна застарілість рухомого складу;
- велике споживання дефіцитних ресурсів;
- негативний вплив на навколишнє середовище, який досягає у загальному антропогенному забрудненні майже 40 %, що перебільшує будь-яку іншу галузь промисловості;
- зростання великої кількості відходів.

Відомо, що сьогодні в світі 99,8 % автомобільного транспорту працює на двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) [29]. Автори роботи [29] висловлюють думку, що, незважаючи на розвиток електромобілів і гібридів, до 2040 року 85...90 % транспортної енергії буде надходити від звичайного рідкого палива, яке приводить у дію двигуни внутрішнього згорання.

Привертає увагу той факт, що ДВЗ, який є основною силовою установкою автомобілів, під час роботи спалює велику кількість автомобільного палива та повітря, створює значний хімічний та тепловий тиски на навколишнє середовище [14, 15]. Збільшення цін на автомобільні бензини та дизельні палива ставлять задачу зменшення споживання автомобільного палива за рахунок зниження маси автомобіля. При цьому збільшення міцності розглядається як необхідна умова збереження безпеки автомобілів при ДТП.

Підписання Угоди про асоціацію між Україною та ЄС поставило перед автомобільним транспортом країни важливі та актуальні завдання розвитку екологічно безпечного та ресурсозберігаючого напрямку [19, 20, 22, 25].

Важливим пунктом Паризької угоди є скорочення викидів за рахунок електрифікації транспорту. В роботі [31] проведено комплексне дослідження розвитку електромобілів в Україні та пов'язаної з ними інфраструктури крізь призму світового досвіду. Суттєвими перевагами електромобілів є відсутність викидів вихлопних

газів при експлуатації, а також ефективність електродвигуна, яка складає близько 80 % [2, 31]. Але є і недоліки: більша вага електромобілів (у середньому на 500 кг більше, ніж аналогічні автомобілі з ДВЗ) та більша вартість, яка пов'язана з акумуляторними батареями [2, 31].

Проблеми, які пов'язані з екологічним забрудненням навколишнього середовища, сьогодні виходять на перше місце серед проблем на автомобільному транспорті [14, 19, 20].

Питання суперечності між користю від автомобільного транспорту та його шкідливим впливом на навколишнє середовище в умовах дефіциту ресурсів та значних руйнувань транспорту та транспортної інфраструктури в нашій країні вирішують різними шляхами: удосконаленням конструкції автомобілів; використанням якісних автомобільних експлуатаційних матеріалів; підвищенням якості діагностування; технічного обслуговування і ремонту автомобілів; розвитком електромобілів і гібридних автомобілів [15, 18, 31].

Одним з перспективних напрямів можна вважати розробку нових конструкційних матеріалів та технології виготовлення деталей автомобілів.

Мета

Метою роботи є огляд і систематизація металевих конструкційних матеріалів для виробництва і ремонту деталей автомобілів та аналіз сучасних тенденцій їх подальшого розвитку.

Методика

До основних проблем, які сьогодні пов'язані з металевими конструкційними матеріалами, можна віднести наступні:

- висока густина матеріалів, внаслідок чого збільшується маса автомобіля, витрати паливно-мастильних матеріалів і кількість шкідливих викидів в атмосферу;
- потреба забезпечення міцності і надійності автомобільних конструкцій;
- потреба забезпечення пасивної і активної безпеки;
- схильність матеріалів до корозії, про масштаби якої дозволяє судити той факт, що приблизно 20 % одержуваної у світі сталі йде на покриття втрат від корозії;

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

– задача зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище;

– розробка нових матеріалів, які задовольняють сучасним вимогам;

– вибір та обґрунтування конструкційних матеріалів для деталей автомобілів;

– підготовка до повоєнної відбудови, потреба економії ресурсів.

Вирішення цих проблем, які пов'язані зі зниженням матеріаломісткості, підвищенням безпеки та відповідністю екологічним нормам, наразі є важливим та актуальним.

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 ударну в'язкість).

Результати

Вуглецеві сталі. При виробництві та ремонті автомобілів використовують різні металеві конструкційні матеріали, проте найбільш широкое застосування знайшли сталі.

Сталі – сплави заліза з вуглецем та іншими легуючими елементами, в яких вуглецю міститься від 0,02 до 2,14 % [17].

Широке використання сталей на автомобільному транспорті пояснюється наступними факторами:

– великою кількістю заліза в земній корі (4,2 %);

– здатністю заліза змінювати свої властивості внаслідок легування, мікролегування, термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробки;

– приналежністю сталей до екологічних «зелених» матеріалів, тобто матеріалів, що не забруднюють навколишнє середовище після завершення експлуатації деталей, а повністю перероблюються в нові якісні деталі.

Сьогодні на виготовлення автомобілів у промислово розвинених країнах витрачається до 15 % усієї виробленої сталі.

Більше 80 % тоннажу виливків виробляють із залізобуглецевих сплавів [3].

Зі сталі у світі щорічно виготовляють до 70 млн кузовів лише легкових автомобілів (моделі автомобілів Polo, Jetta, Passat, Tiguan

Teramont, Touareg, Mercedes, Ford, Mitsubishi тощо) [24].

У масі сучасного легкового автомобіля сталь становить від 40 до 45 %, чавун – 13...15 %, пластмаси – 7...10 %, цинк – до 1 % залежно від класу (А клас – mini cars (мікроавтомобілі), В клас – Small cars (малі автомобілі), клас С – Medium cars (європейський «середній клас»), клас D – Larger cars (великі сімейні автомобілі), клас E – Executive cars («бізнес-клас»)) [24].

Сучасний підхід до оцінки новації у виробництві автомобілів використовує втілену енергію в продукцію.

Втілена енергія – енергія, яка використовується для виробництва матеріалу чи продукту, з урахуванням видобутку, виробництва та транспортування [2].

Порівняння значення втіленої енергії для окремих конструкційних матеріалів представлено в табл. 1 [28].

Таблиця 1

Втілена енергія конструкційних матеріалів

Table 1

Embodied energy of construction materials

Матеріал з урахуванням способу виробництва	Втілена енергія (в середньому), МДж/кг
Титан	920
Алюмінієвий лист (первинний)	255
Мідь	151
Структурні полімери	84
Магній	80
Нержавіюча сталь	79
Литий алюміній (первинний)	58
Вуглецева та низьколегована сталь	51
Структурні полімери (вторинні)	42
Скло (основне)	30
Високоміцний чавун (ADI)	30
Високоміцний чавун / чавун з компакт. графітом	26
Литий алюміній (вторинний)	23
Сірий чавун	23

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Наведені в табл. 1 дані показують, що вуглецева та низьколегована сталі мають значно меншу втілену енергію (51 МДж/кг) серед сталей і кольорових металів.

Вуглецевими сталями називають сталі, в яких основним легуючим елементом є вуглець [17]. В вуглецевих сталях містяться в невеликих кількостях постійні домішки (кремній, марганець, сірка, фосфор) [11].

Сортамент вуглецевих сталей, що застосовуються під час виробництва та ремонту автомобілів, широкий. Хімічний склад сталей, фізичні, механічні, технологічні та експлуатаційні властивості наведені в ДСТУ та інших стандартах [4, 7, 8, 11].

Відомі класифікації вуглецевих сталей поділяють їх за хімічним складом, ступенем розкислення, структурою, міцністю, призначенням та якістю [17, 23].

За вмістом вуглецю вуглецеві сталі класифікують на:

- низьковуглецеві (до 0,25 % C);
- середньовуглецеві (0,3...0,55 % C);
- високовуглецеві (0,6...0,85 % C).

За ступенем розкислення і характером застудіння сталі класифікують наступним чином:

- спокійні (сп);
- напівспокійні (пс);
- киплячі (кп).

За структурою в відпаленому (рівноважному) стані вуглецеві сталі поділяють на:

– доевтектоїдні (що містять до 0,8 % вуглецю і мають у структурі перліт і надлишковий ферит);

– евтектоїдні (що містять 0,8 % вуглецю і мають перлітну структуру);

– заевтектоїдні (що містять вуглецю від 0,8 % до 2,14 %, мають структуру: перліт та цементит вторинний, сітка цементиту розташована навколо зерен перліту).

За міцністю, що оцінюється тимчасовим опором, сталі можна розділити на:

- сталі нормальної (середньої) міцності (σ_B до 1 000 МПа);
- сталі підвищеної міцності (σ_B до 1 500 МПа).

За призначенням вуглецеві сталі класифікують на:

- конструкційні;
- інструментальні.

За якістю вуглецеві конструкційні сталі класифікують на [17, 23]:

- сталі звичайної якості (зміст S \leq 0,060 % та P \leq 0,070 %);
- якісні (зміст S \leq 0,035 % та P \leq 0,035 %).

Стосовно основних автомобільних деталей вуглецеві конструкційні сталі умовно можна розділити на три основні групи:

- вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості;
- вуглецеві конструкційні якісні сталі;
- вуглецеві конструкційні сталі з покращеною оброблюваністю різанням.

Першу групу складають вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості загального призначення (ДСТУ 2651:2005 (ГОСТ 380–2005)), які випускають у вигляді прокату (балки, прутки, листи, куточки, труби тощо) і поковок [4].

Залежно від гарантованих властивостей заводи-виробники поставляють три групи сталей:

- сталі групи А – з гарантованими механічними властивостями;
- сталі групи Б – з гарантованим хімічним складом;
- сталі групи В – з гарантованими механічними властивостями та хімічним складом [23].

Вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості маркують поєднанням літер Ст, що позначають слово «сталь», і цифрою від 0 до 6, що показує умовний номер марки і не показує вміст вуглецю (чим більше число, тим більше вміст вуглецю, вище межа міцності σ_B і межа плинності $\sigma_{0,2}$) [23].

Вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості марок Ст 2, Ст 3, Ст 4, Ст 5, Ст 6 застосовуються для виготовлення згинанням, штампуванням або зварюванням автомобільних мало- і середньонавантажених деталей і конструкцій загального призначення: гайок, болтів, заклепок, осей, тяг, зварювальних конструкцій.

Обмежують застосування вуглецевих конструкційних сталей звичайної якості в автомобілебудуванні наступні фактори:

- вміст вуглецю до 0,49 %;
- підвищений вміст шкідливих домішок – сірки та фосфору (0,04...0,07 %);
- значна кількість неметалевих включень.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Другу групу складають вуглецеві конструкційні якісні сталі (ДСТУ 7809:2015), які характеризуються нижчим, ніж у вуглецевих конструкційних сталей звичайної якості вмістом шкідливих домішок (сірки та фосфору) і неметалевих включень [7]. Сталі поставляються у вигляді прокату, поковок та інших напівфабрикатів з гарантованим хімічним складом та механічними властивостями.

Вуглецеві конструкційні якісні сталі маркуються двоцифровими числами 05, 08, 10, 15, 20, ... , 60, що позначають середнє значення вмісту вуглецю в сотих частках відсотка [7, 23]. Наприклад, сталь 05 містить у середньому 0,05 % С, сталь 45 – 0,45 % С.

Киплячі та напівспокійні сталі маркують індексами кп і пс, відповідно, спокійні сталі маркують без індексу. Киплячими виробляють сталі 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп, напівспокійними – 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

До важливих техніко-економічних показників сталей відносяться [17, 23, 26]:

- механічні (міцність, пластичність, твердість, ударна в'язкість та ін.);
- технологічні (рідинотекучість, оброблюваність різанням, зварюваність, деформовуваність та ін.);
- експлуатаційні (зносостійкість, жароміцність, жаростійкість та ін.);
- економічні (собівартість виробництва та ін.).

Технологічні властивості вуглецевих конструкційних сталей наведено в табл. 2.

Вуглецеві конструкційні якісні сталі знаходять широке застосування в автомобільній техніці завдяки здатності набувати різноманітні механічні та технологічні властивості в залежності від вмісту вуглецю та термічної обробки.

Групу вуглецевих конструкційних якісних сталей можна розбити на 3 підгрупи: низько-, середньо- і високовуглецеві сталі.

Низьковуглецеві сталі поділяють за призначенням на високопластичні (сталі марок 08 і 10) і цементовані (сталі 15, 20, 25).

Низьковуглецеві високопластичні сталі марок 08 і 10 з вмістом вуглецю, відповідно, 0,08 % і 0,10 % маломіцні, добре деформуються в холодному стані (особливо методом холодної витяжки), не схильні до відпускнуї крихкості, мають гарну зварюваність і оброблюваність

різанням. Ці марки сталей застосовують для виготовлення статично помірно навантажених кузовних облицювальних деталей, панелей даху та дверей. Без термічної обробки в гарячостаному стані їх використовують для шайб, прокладок та інших деталей, що виготовляються холодною деформацією та зварюванням.

Таблиця 2

Технологічні властивості вуглецевих конструкційних сталей

Table 2

Technological properties of carbon structural steels

Марка сталі	Зварюваність	Оброблюваність різанням		
		НВ	К ₀	К ₀ '
Ст2сп, Ст2пс, Ст2кп	Зварюються без обмежень РДЗ, АДЗ під флюсом і газовим захистом, ЕШЗ, КТЗ. Для товщин більше 36 мм рекомендується підігрів і подальша термообробка.	137	2,00	1,60
Ст3сп, Ст3пс		124	1,80	1,60
Ст5сп, Ст5пс, Ст6сп, Ст6пс	Обмежено зварюються РДЗ, АДЗ під флюсом і газовим захистом, ЕШЗ. Рекомендується підігрів і подальша термообробка.	158	1,20	1,20

У гарячостаному стані

08	Зварюються без обмежень (крім хіміко-термічно оброблених деталей) РДЗ, АДЗ під флюсом та газовим захистом, КТЗ.	131	2,10	1,65
10, 10кп		99... 107	2,10	1,60
15		143	1,80	–
20		126... 131	1,70	1,60
25				

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження табл. 2
Continuation of Table 2

Марка сталі	Зварюваність	Оброблюваність різанням		
		НВ	K_0	K_0'
У гарячокатаному стані				
30	Обмежено зварюються РДЗ, АДЗ під флюсом і газовим захистом, ЕШС. Рекомендується підігрів і подальша термообробка. КТЗ – без обмежень.	143	–	1,70
35		144... 156	–	1,30
40		170	1,20	1,20
45	Важкозварювані РДЗ та КТЗ. Необхідні підігрів і наступна термічна обробка.	170... 179	1,00	1,00
50		196... 202	1,00	0,70
У нормалізованому стані				
55	Не застосовуються для зварювальних конструкцій. КТЗ з подальшою термообробкою.	212... 225	1,00	0,65
60		241	0,70	0,65
У загартованому та відпущеному стані				
65Г	Не застосовується для зварювальних конструкцій. КТЗ без обмежень.	240	0,85	0,80

Примітки: РДЗ – ручне дугове зварювання; АДЗ – автоматичне дугове зварювання; КТЗ – контактне точкове зварювання; ЕШС – електрошлакове зварювання; НВ – твердість за Брінеллем; K_0 і K_0' – коефіцієнти оброблюваності сталей при використанні інструменту з твердих сплавів і швидкорізальної сталі, відповідно.

Область застосування низьковуглецевих високопластичних сталей на автомобільному транспорті:

08кп – основи сидінь, рамки радіатора, корпус та деталі фільтрів, шків, кришки, стійки, підсилювачі, важелі підвісок, стопори для підшипників, хрестовин, обода гальмівних колодок, деталі диска зчеплення, обойми, затиски, вилки для коробок передач, патрубки, трійники, перехідники, заглушки масляної та охолоджуючої систем, спецпрофілі (сухар клапана);

08, 08пс – балки заднього моста, кронштейни опори підвісного підшипника карданного валу, ободи коліс, корпуси дверних замків, шайби, затискачі, гнуті профілі, спецпрофілі;

10кп – балки заднього моста, кронштейни, фіксатори, стопорні шайби, хрестовини кардана, подушки ресор, тяги, хрестовини і болти кріплення шків, покажчики рівня оливи;

10, 10пс – деталі рульового механізму, штоухачі поршня головного циліндра гальма та зчеплення гідроприводу, реактивні штанги, стрижні, осі, пальці, спецпрофілі сухарів клапана.

Низьковуглецеві цементовані сталі марок 15, 20, 25 призначені для виготовлення деталей невеликого розміру, від яких потрібна тверда, зносостійка поверхня і в'язка серцевина [23]. Поверхневий шар після цементації зміцнюють гартуванням у воді з наступним низьким відпуском. Серцевина через низьке прожарювання зміцнюється слабо. Сталі застосовують також гарячекатаними і після нормалізації. Сталі пластичні, добре штамнуються і зварюються, не чутливі до перегріву і відпускнуї крихкості.

Автомобільні деталі, що виготовляються з цементованих сталей, мають невисоку міцність і піддаються невеликим динамічним навантаженням:

15кп, 15, 15пс – кожух зчеплення, рами, карданні вали, диски колеса, штоухач клапана;

20кп – поперечки, розпірки, підсилювачі, важелі, кронштейни, опори, колодки, клямки, стопори, скоби, вкладиші, шплінти, петлі, осі петлі дверей;

20 – вал рульового управління, карданні вали, коромисло клапана, педалі зчеплення, ручки приводу дверей, хрестовини кардана, сухарі клапанів, осі, кронштейни, рульові тяги, шків, опори, кронштейни, рульові тяги, шків,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

шестерні спідометра, обмежувачі, штовхачі, патрубки, втулки;

25кп, 25, 25пс – підрамники, поперечки.

Середньовуглецеві (поліпшені) сталі марок 30, 35, 40, 45, 50, 55 відрізняються більшою міцністю, але меншою пластичністю, ніж низьковуглецеві. Їх застосовують після поліпшення, нормалізації та поверхневого загартування. У поліпшеному стані – після загартування та високого відпуску на структуру сорбіту – досягаються висока в'язкість, пластичність та мала чутливість до концентраторів напружень. Сталі використовують для виготовлення методом гарячого штампування різних деталей широкого застосування: валів, зубчастих коліс, півосей та ін. Для них використовують усі види термічної обробки, що значно підвищує міцнісні та експлуатаційні властивості деталей.

З середньовуглецевих сталей виготовляють такі автомобільні деталі:

30кп – шочи вилки включення зчеплення;

30 – вал черв'яка рульового механізму, вісь перемикачів передач в кришці управління коробки передач, пальці тяги рульового управління, стрижні замків дверей, багажника, дверні ручки, підрамники, кронштейни кріплення супорта переднього гальма, вісь валика вимикання зчеплення;

35кп – педалі гальма, важелі гальм включення зчеплення;

35 – шестерні колінчатого валу, масляного насоса, вал рульового управління, поздовжні і поперечні тяги, шток амортизатора, важіль управління коробкою передач, вісь важеля підвіски, маточини веденого диска зчеплення, сошка рульового управління, гайки шатунних болтів.

Для виготовлення більших деталей, що працюють при невисоких циклічних і контактних навантаженнях, використовують сталі марок:

40 – шестерні колінчатого валу, вінець маховика, шатуни та кришки шатуна, півосі заднього моста, осі важеля управління коробки передач, розподільні вали, валики перемикачів заднього ходу, рульові сошки, важелі підвіски, шпильки кріплення колектора, буксирні гаки;

45 – вали розподільні, водяного насоса, шестерні колінчатого валу, вінці маховика, балки передньої осі неведучого мосту, пальці поршневі, ресорні пальці, втулки упорні підшипни-

ка, вісь шестерні заднього ходу, важелі зчеплення;

50 – шкворні поворотних цапф, маточини веденого диска зчеплення, буксирні гаки вантажних автомобілів.

Розподільні вали, виготовлені зі сталей 40 і 45 піддають поверхневому загартуванню.

Високовуглецеві сталі – це сталі марок 60, 65, 70, 75, 80, 85 з високою концентрацією вуглецю, а також сталі з підвищеним вмістом марганцю – 60Г, 65Г і 70Г. Сталі мають високу міцність, зносостійкість, високі пружні властивості. Високовуглецеві сталі застосовують переважно для виготовлення пружин і ресорних листів, тому їх називають ресорно-пружинними сталями. Застосовують сталі після загартування та середнього відпуску, нормалізації та відпуску й поверхневого загартування. Сталі чутливі до зростання зерна при нагріванні, мають низьку зварюваність та пластичність у холодному стані.

Високовуглецеві сталі застосовують для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя за наявності високих статичних, динамічних і вібраційних навантажень: хрестовин карданних шарнірів, дисків зчеплення, гнучких валів:

60 – трос спідометра;

65Г – упорні шайби шестерні;

70 – регулювальні кільця провідних шестерень, пружини балансувального грузика, ланцюги, пружинні та упорні шайби;

70Г – ресори, пружини буксирного вузла, тяги жалюзі радіатора;

80 – мембрани сигналів;

85 – ведені диски зчеплення, буксирні гаки.

Вуглецеві ресорно-пружинні сталі характеризуються невисокою релаксаційною стійкістю, особливо при нагріванні, тому вони не придатні для роботи при температурі вище 100 °С. Через низьке прожарювання з них виготовляють пружини невеликого перерізу.

Третю групу сталей складають сталі з покращеною оброблюваністю різанням. Обробка різанням є основним способом виготовлення більшості деталей машин. Оброблюваність різанням набуває великого значення для масового виробництва із застосуванням автоматичних ліній. Підвищити оброблюваність сталі можна введенням в низьковуглецеву конструкційну

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

сталь сірки і фосфору [23]. Для досягнення підвищеної оброблюваності сталь містить 0,08...0,30 % сірки та 0,05...0,15 % фосфору й поставляється в холоднотягнутому стані у вигляді прутків.

Сталі з поліпшеною оброблюваністю різання відносяться до автоматних сірчистих і маркуються літерою А (автоматна) і цифрою, що показує середнє вміст вуглецю в сотих частках відсотка: А11, А12, А20, А30, А35, А40Г.

Сталь автоматна застосовується, головним чином, для виготовлення автомобільних кріпильних деталей (болтів, гайок, шпильок) на автоматних верстатах.

Сталі А11, А12, А20 використовують для кріпильних деталей, а також малонавантажених деталей складної форми, до яких пред'являються вимоги високої точності розмірів і чистоти поверхні:

А11 – болти, гайки, вилки включення зчеплення, ланцюги;

А12, А20 – шестерні колінчатого валу, вісь важеля диска зчеплення, шестерня приводу масляного насоса, вісь дросельної заслінки, опора колодки гальма.

Для виробництва деталей типу гайок, болтів, осей, шпильок, що зазнають більш високих напружень, застосовують сталі марок А30, А35, А40Г.

Автоматні сірчисті сталі мають анізотропію механічних властивостей – знижені в'язкість, пластичність і опір втоми в поперечному напрямку прокатки, що разом з низькою корозійною стійкістю обмежує їхнє застосування для виготовлення відповідальних деталей машин.

Проте сталі мають свої недоліки. Серйозним недоліком сталей є їх схильність до корозії, про масштаби якої дозволяє судити той факт, що приблизно 20 % одержуваної у світі сталі йде на покриття втрат від корозії. Крім того, транспортні засоби через корозію вимагають ремонту, а ремонтні роботи погано піддаються механізації та автоматизації і вимагають робочої сили високої кваліфікації. Сьогодні у світі приблизно десята частина робочої сили зайнята ремонтними роботами. Другим суттєвим недоліком сталей є висока густина, внаслідок чого транспортні засоби виявляються надто потужними. Наприклад, частка корисного вантажу на автотранспорті становить 10...20 %.

Практика використання сталей, чавунів і кольорових сплавів на прикладах деяких деталей автомобілів. Блоки циліндрів ДВЗ виготовляють з сірих чавунів (наприклад, сірий чавун марок СЧ150, СЧ250), легованих чавунів, алюмінієвих сплавів (наприклад, АЛ4) та інших сплавів [9, 18].

Матеріалом гільзи можуть бути чавуни (наприклад, СЧ200), сталі (наприклад, 38ХМЮА), кераміка або полімерні сплави [9, 18].

Колінчаті вали виготовляються з вуглецевих та легованих сталей (наприклад, 45, 50, 50Г, 18ХНВА, 18ХНМА, 18Х2Н4ВА, 20ХН2М, 20Х2Н4А, 20ХН3А, 20ХГНТР, 25ХГТ, 25ХГНМАЮ, 30ХГТ, 38ХН3ВА, 38ХН3МА, 40ХНМА, 45Г2, 45Х, 45ХН, 60ХФА), спеціальних високоміцних модифікованих чавунів (наприклад, ВЧ 500-7) шляхом відливання, кування або штампування [6, 7, 17, 18].

Матеріалом розподільного вала можуть бути вуглецеві та леговані сталі (наприклад, сталі 40, 40Г, 40Х, 45, 50, 15Х, 18ХГТ, 30ХГТ, 45ХН, 50Г2, 18ХГТ), леговані чавуни [7, 18]. Розподільні вали виготовляють гарячим штампуванням або литтям в оболонкові форми.

Шатуни ДВЗ виготовляють з вуглецевих та легованих сталей (наприклад, 40, 45, 40Г, 45Г2, 40Х, 40Р, 40ХФА, 40ХН2МА) штампуванням або періодичною прокаткою [16, 18].

Основним матеріалом для виготовлення кілець та тіл кочення підшипників є шарикопідшипникові хромисті сталі (наприклад, ШХ9, ШХ15, ШХ15–Ш, ШХ15–В, ШХ15СГ, ШХ15СГ–Ш, ШХ15СГ–В, ШХ20СГ) [18, 23].

Сепаратори виготовляють із вуглецевих сталей звичайної якості, бронз, латуней, полімерних матеріалів [18].

Матеріал пружин повинен мати високі пружні властивості, достатню міцність та стійкість проти втомного руйнування [18, 23].

Пружини виготовляють з конструкційних сталей з підвищеним вмістом вуглецю – приблизно в межах 0,5...0,7 %, часто з добавками марганцю і кремнію. Наприклад, пружини виготовляють з ресорно-пружинних вуглецевих та легованих сталей: 65, 70, 75, 65Г, 50С2, 55С2, 60С2, 70С3А, 55СГ, 60СГ, 50ХФА, 50ХГФА, 60С2ХА та ін. [18]. Головна вимога полягає в тому, щоб сталь мала високу межу пружності. Це досягається загартуванням з на-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ступним відпуском при температурах в межах 300...400 °С.

Часто пружини виготовляють з вуглецевих інструментальних сталей У7, У8А, У10А, У12А [5, 18]. Високу твердість і пружність створює наклеп від холодної протяжки. Після виготовлення, пружину відпускають при 250...350 °С для зняття внутрішніх напружень, що підвищує межу пружності.

Традиційно для деталей кузова автомобіля застосовувалася, як правило, низьковуглецева холоднокатана сталь із вмістом вуглецю не більше 0,08 %.

При використанні гарячекатаної смугової сталі застосовувалися такі варіанти:

- нормалізовані сталі з високим вмістом вуглецю і сірки, мікролеговані титаном;
- термомеханічна обробка сталі з високим вмістом титану для контролю форми сульфідів або мікролегованої ніобієм сталі з низьким вмістом сірки.

Тенденції впровадження нових перспективних матеріалів.

Якість сучасних конструкційних матеріалів забезпечується різними шляхами: термічною та термомеханічною обробками, легуванням, нанесенням захисних покриттів та ін. [26].

Підвищення міцності сталей для автомобілебудування від 200...250 МПа до 375 МПа дає змогу знизити масу автомобіля на 15...17 %. Як показує практика, підвищення міцності листа на 30...50 % дає можливість знижувати товщину кузовних деталей у діючих конструкціях, де перешкодою є втрата жорсткості, на 15...20 % і в новостворених – на 20...25 % [24].

Перспективним напрямом збільшення ефективності автомобіля з ДВЗ є зменшення маси автомобіля [2].

Але інтенсивний розвиток автомобільного транспорту висуває нові вимоги до конструкційних матеріалів і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, зменшити вагу автомобілів та підвищити їхню безпеку можливо шляхом використання сучасних матеріалів, найбільш перспективними з яких є [21]:

- високоміцні сталі;
- алюмінієві сплави;
- наноматеріали;
- композити.

Основною сучасною тенденцією в автомобілебудуванні є зниження ваги при збереженні високої безпеки [24]. Це можливо досягти шляхом використання високоміцних сталей.

Високоміцними називають сталі, які мають межу міцності понад 1500 МПа, що досягається підбором хімічного складу та оптимальною термічною обробкою [23].

Сьогодні при виготовленні панелей кузова застосовують високоміцні сталі, наприклад [24, 25]:

– ПНП-сталі (пластичність наведена перетворенням) (TRIP-сталі (Transformation Induced Plasticity (TRIP) steels)), які містять Cr, Ni, Mn, Mo, Si. Прикладами марок сталей є 25H25M4Г, 30X9H8M4Г2C2. Сталі термічно обробляють на аустеніт, після чого пластично деформують (прокатуванням, волочінням та ін.). В результаті отримують аустенітну структуру матеріалу, яка зміцнена дрібними зернами мартенситу;

– сталі, що штампуються – сталі з низьким вмістом вуглецю та азоту, які леговані Mn, Al, P, Si, B. Для низьколегованих сталей застосовують неповне гартування у воді, в результаті чого отримують в структурі матеріалу феритну фазу, яка забезпечує пластичність і штампуємість, і мартенситну фазу у вигляді дрібних включень, які підвищують міцність.

Важливими властивостями високоміцних сталей є висока міцність та жорсткість, які дозволяють не тільки значно підвищити міцність і жорсткість деталей (наприклад, кузовів автомобілів) порівняно зі звичайними сталями, але й ефективно поглинати енергію удару при ДТП, що захищає пасажирів та знижує ризик їхнього травмування [21, 23].

Важливими властивостями алюмінієвих сплавів є менша (порівняно зі сталями) густина, висока корозійна стійкість. Гарні технологічні властивості дозволяють отримувати деталі автомобілів різними технологіями лиття, обробки тиском [21, 23]. Використання алюмінієвих сплавів для виробництва деталей автомобілів (наприклад, у конструкціях кузова та шасі) дозволяє зменшити вагу автомобіля, підвищити його паливну ефективність, зменшити кількість викидів CO₂ [21].

Але привертає увагу той факт, що спроби заміни матеріалу деталей з чорних металів на алюміній для зменшення їх маси вимагає інвес-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тицій у нові технології та устаткування, що збільшує вартість і енергоємність [2]. Крім того, низька питома вага матеріалу не завжди означає меншу вагу чи об'єм виробу. Автори роботи [27] показали, що з чавуну з компактним графітом (CGI) можливо створювати більш компактні дизельні двигуни з меншою вагою ніж їхні аналоги з алюмінію. Отриманий результат пояснюється тим, що конструкція з CGI (більшої жорсткості) скорочує довжину двигуна, знижуючи загальну масу, ніж у довшого двигуна з алюмінію [27].

При виборі алюмінію для кузова автомобіля треба врахувати, що вартість алюмінію значно більша ніж сталі, а технологія з'єднання деталей з алюмінію більш складна, більше коштує, підвищує витрати на електроенергію, потребує спеціального обладнання.

Сьогодні майже у всіх конструкційних матеріалів структурні елементи (фази) значно перевищують нанорозміри, а при підвищенні міцності матеріалів зменшується пластичність. Ця закономірність значно обмежує використання конструкційних матеріалів.

В наноматеріалах можливо поєднувати високі значення міцності і пластичності.

Сьогодні активно розробляються наноматеріали, які мають унікальні властивості, наприклад, високу міцність, малу густину та велику зносостійкість [21, 23].

На автомобільному транспорті наноматеріали використовуються для створення покриттів та композитів, що підвищує міцність та зносостійкість деталей автомобілів, підсилює ефективність поглинання енергії удару, що, в свою чергу, покращує безпеку пасажирів при ДТП [21].

Іншими прикладами наноматеріалів, які використовуються в автомобілях, є [1]:

- графенові листи в літєвих батареях;
- вуглецеві нанотрубки, які використовуються як армувальні елементи в композитних матеріалах;
- вуглецеві нанотрубки для виготовлення вуглець-літєвих батарей і суперконденсаторів;
- пружини, що отримані високотемпературною термомеханічною обробкою та мають великі значення міцності та довговічності;
- низковуглецеві малолеговані сталі із субмікроструктурною структурою, які при кімнатній

температурі мають міцність в 2...2,5 рази більше ніж у звичайних сталей;

– сталь 12X18H10T після рівноканального кутового пресування при кімнатній температурі із розміром зерна 100 нм має межу міцності в 6 разів більше ніж у цієї сталі після термічної обробки.

Перспективним напрямом розвитку конструкційних матеріалів для деталей автомобілів є композиційні матеріали [21].

Композиційний матеріал (КМ) – це матеріал, який складається із двох або більше компонентів (хімічно різнорідних фаз) та має нові властивості, що відрізняються від суми властивостей складових елементів [1].

Створення композицій, в яких об'єднані кращі якості окремих складових, дозволяє регулювати властивості композиційних матеріалів за рахунок вибору компонентів, їх концентрації, розмірів, форми, орієнтації та міцності з'єднання одне з одним [1].

Композиційні матеріали мають анізотропію механічних і фізичних характеристик, а умови руйнування КМ значно відрізняються від умов руйнування металів [1].

Композиційні армовані матеріали залежно від матеріалу матриці можна розбити на три групи:

- з металевою матрицею – металеві (частіше Al, Mg, Ni, Fe, Ti та їх сплави) композиційні матеріали (МКМ);
- з полімерною матрицею – полімерні композиційні матеріали (ПКМ);
- з керамічною матрицею – керамічні композиційні матеріали (ККМ) [1].

За геометричною характеристикою наповнювача композиційні матеріали поділяють на групи:

- з нульмірними наповнювачами, розміри яких в трьох вимірах мають один і той же порядок;
- з одномірними наповнювачами, один розмір яких значно перевищує два інших;
- з двомірними наповнювачами, два розміри яких значно перевищують третій.

За схемою розміщення наповнювачем КМ поділяють на три групи:

- з одноосним (лінійним) розташуванням у вигляді волокон, ниток, нитковидних кристалів у матриці паралельно один одному;

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

– з двоосним (у площині) розташуванням наповнювача, матриці з нитковидних кристалів, фольги у паралельних площинах;

– з трьохосним (об’ємним) розташуванням і відсутністю переважного напрямлення його розташування.

За орієнтацією та типом арматури (конструкційний принцип) всі КМ можна розбити на дві групи: 1) ізотропні; 2) анізотропні [1].

До ізотропних КМ відносяться матеріали з нульмірними наповнювачами, що зміцнюються дисперсними частинками різної дисперсності, псевдосплави та матеріали, які хаотично армовані короткими (дискретними) волокнами або ниткоподібними кристалами («вусами»), а також при трьохосному (об’ємному) розташуванні волокон, що не мають переважного напрямлення розташування.

До анізотропних КМ відносяться армовані матеріали з одномірними або двомірними наповнювачами, в яких волокна орієнтовані у визначених напрямках.

За способом отримання (технологічний принцип) металеві КМ ділять на ливарні і деформовані [1].

За призначенням (експлуатаційний принцип) КМ можна розбити на:

– матеріали загальноконструкційного призначення (наприклад, несучі конструкції автомобілів, двигунів);

– жароміцні (наприклад, камери згорання та інші вироби, що працюють при підвищених температурах);

– термостійкі (для виробів, які експлуатуються в умовах різних теплових змін);

– фрикційні і антифрикційні (підшипники ковзання, шестерні та ін.);

– ударотривкі (броня літаків, танків та ін.);

– теплозахисні;

– зі спеціальними властивостями (електричними, магнітними, ядерними, оптичними та ін.) [1].

Новим напрямом створення КМ є метод модифікації волокон шляхом введення в їх склад значних кількостей мінеральних наповнювачів (до 60 % об.), який дозволяє отримати композитні волокна. В якості наповнювачів використовують карбонат кальцію, силікати (азбест, каолін, тальк), окисли і високодисперсні порошки металів, сажу, графіт й ін. Волокна, які отрима-

ні таким методом, також є композиційними матеріалами [1].

Перспективним напрямом розвитку КМ є створення нанокомпозитів з використанням наповнювачів з розміром частинок від декількох нанометрів до десятків нанометрів. Найчастіше в якості наповнювачів використовуються такі матеріали [1]:

– органоглини на основі монтморилоніта Montmorillonite organoclays (ММТ);

– вуглецеві нановолокна Carbon nanofibers (CNFs);

– вуглецеві нанотрубки Carbon nanotubes (багатостінні (MWNTs), тонкі (SDNTs) і одностінні (SWNTs));

– наноксид кремнію (N-silica);

– наноксид алюмінію Nanoaluminum oxide (Al_2O_3);

– наноксид титану (TiO_2);

– нанометалеві частинки.

КМ, як правило, мають вищі технологічні та службові характеристики, тому що в них досягається можливість поєднання переваг різних матеріалів.

КМ відрізняються від сплавів більш високими значеннями тимчасового опору, питомої міцності і межі витривалості (на 10...50 %), модуля пружності, коефіцієнта жорсткості, зносостійкості і зниженою схильністю до утворення тріщин.

Наявність границь розділу між компонентами суттєво підвищують тріщиностійкість, що внаслідок приводить до підвищення характеристик в’язкості руйнування.

У шаруватих композиційних матеріалах, що складаються з шарів різних матеріалів, або псевдосплавів, які містять фази, що різняться за своїми властивостями, майже не можливо визначитися з тим, яка складова є матрицею, а яка – наповнювачем. Властивості цих складових доповнюють одна одну і визначаються однією підсиленою характеристикою або багатьма взаємно доповнюючими характеристиками.

Композити мають високу стійкість до ударів та корозії, що підвищує довговічність автомобіля та знижує витрати на його обслуговування [1, 21].

Композиційні матеріали (композити), які мають високу міцність та низьку густину, дозволяють виробляти панелі кузова та інші еле-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

менти, які мають підвищену жорсткість при низькій вазі.

Процес виготовлення кузовів з композитних матеріалів дуже трудомісткий, потребує багато часу, дорого коштує. Серйозним недоліком є неможливість відновлення кузовів з композитних матеріалів після деформації при ДТП.

Шаруваті металеві композиційні матеріали. Одним із перспективних шляхів вирішення проблеми підвищення надійності та довговічності деталей автомобілів, що працюють в складних умовах навантаження, можуть бути шаруваті металеві композиційні матеріали (ШМКМ), які дозволяють формувати структуру з границями розділу шарів та забезпечувати рівень властивостей відповідно до умов експлуатації деталей [1]. ШМКМ виготовляють прокаткою та пресуванням, термодифузійним зварюванням, литтям, осадженням на поверхню одного або декілька компонентів та ін. Одним із способів, що характеризується високою технологічністю та економічністю, є створення ШМКМ зварюванням вибухом [13].

Авторами роботи у якості вихідних матеріалів для отримання шаруватих композиційних матеріалів були обрані: легована сталь 12X18H10T та вуглецева сталь 20 [7, 10, 30]. Обрані сталі мають різну структуру (аустенітну – в сталі 12X18H10T (рис. 1) та ферито-перлітну – в сталі 20 (рис. 2), різний рівень міцності та пластичності.

Композиційні матеріали шаруватої структури 12X18H10T + 20 були отримані при різних параметрах зварювання вибухом: швидкості метання пластини, швидкості руху точки контакту, кута зіткнення, тиску на межі зіткнення. Було отримано ШМКМ на режимах зварювання 1, 2 та 3.

Властивості та працездатність композиційних виробів значною мірою визначаються неоднорідною за складом зоною з'єднання шарів, структура та властивості якої формуються за рахунок розплавлення приповерхневих шарів, їх перемішування та дифузії елементів.

В результаті зварювання вибухом, всі композиційні матеріали мали границі з'єднання шарів хвилеподібної форми. В ШМКМ були виміряні довжина та амплітуда хвиль. Розкид серед вимірених величин знаходився в межах 10 %.

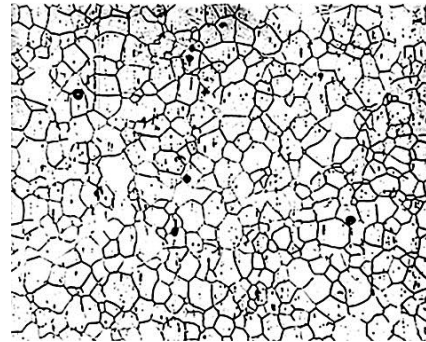


Рис. 1. Мікроструктура сталі 12X18H10T, x100

Fig. 1. Microstructure of steel 12X18H10T, x100

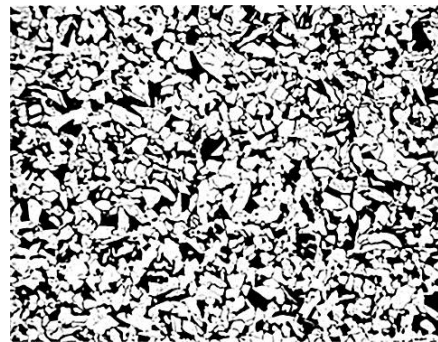


Рис. 2. Мікроструктура сталі 20, x100

Fig. 2. Microstructure of steel 20, x100

В зоні з'єднання матеріалів, отриманих на режимі зварювання 1, утворилися регулярні хвилі (рис. 3). В зоні з'єднання матеріалів, отриманих на режимі зварювання 2, утворилися регулярні хвилі з незначними завихреннями на гребнях. В зоні з'єднання матеріалів, отриманих на режимі зварювання 3, утворилися великі хвилі з яскраво вираженими завихреннями на гребнях, а в окремих точках утворилися ділянки литої структури.

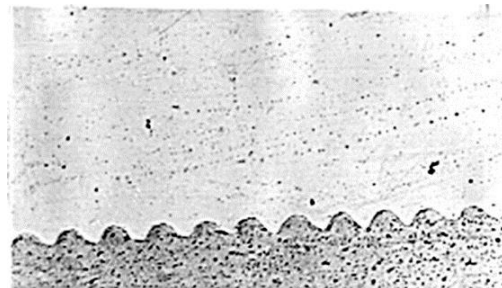


Рис. 3. Мікроструктура з'єднань сталі 12X18H10T – сталь 20, x50

Fig. 3. Microstructure of joints steel 12X18H10T – steel 20, x50

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Зварювання вибухом супроводжувалося значним зміцненням металів в зоні з'єднання. Ступінь зміцнення розраховувалася як відношення мікротвердості після зварювання вибухом до вихідної мікротвердості. Ступінь зміцнення сталі 12X18H10T склала 1,5 (режим зварювання 1), 1,6 (режим зварювання 2) та 1,7 (режим зварювання 3). Для сталі 20 ступінь зміцнення склала 1,6 (режим зварювання 1), 1,9 (режим зварювання 2) та 2,1 (режим зварювання 3).

В результаті дослідження встановлено, що збільшення тиску у фронті хвилі детонації викликає зростання ступеня зміцнення зварюваних металів і ширини зони зміцненого шару.

Важливою характеристикою матеріалу, яка значною мірою визначає його схильність до крихкого руйнування, є ударна в'язкість [23, 26].

Випробування на ударний вигин шаруватих зразків розмірами 10x10x55 мм з надрізом Менаже ($r = 0,25$ мм) проведено при температурі 20 °С згідно з ДСТУ ISO 148–1:2022 на маятниковому копрі з максимальною енергією удару 300 Дж [12]. В композиційних матеріалах надріз було виконано в сталі 12X18H10T. Дно надрізу розташовувалося на відстані 4 мм від межі з'єднання шарів. Площина руйнування зразків була перпендикулярна до площини з'єднання шарів металів. Результати випробувань представлені в табл. 3.

Таблиця 3

**Ударна в'язкість шаруватих композицій сталей
12X18H10T + сталь 20**

Table 3

**Impact strength of layered compositions steel
12X18H10T + steel 20**

Матеріал	KCV, Дж/см ²
Сталь 12X18H10T	215,0
Сталь 20	55,0
Сталь 12X18H10T + сталь 20, режим зварювання 1	138,0...142,0
Сталь 12X18H10T + сталь 20, режим зварювання 2	110,0...111,0
Сталь 12X18H10T + сталь 20, режим зварювання 3	100,0

Результати випробування композиційних матеріалів 12X18H10T + 20, що отримані зварюванням вибухом, показали, що ударна в'язкість двошарових композиційних матеріалів займає проміжне положення між значеннями ударної в'язкості сталей 12X18H10T та 20.

Зі збільшенням параметрів зварювання вибухом ударна в'язкість композиційних матеріалів знижується. Композиційні матеріали, що зварювалися на 2-му та 3-му режимах, мали ударну в'язкість на 21 % та 29 %, відповідно, нижче, порівняно з композиціями, що зварені на режимі 1.

**Наукова новизна та практична
значимість**

Проведено комплексний аналіз проблем металевих конструкційних матеріалів, що дозволяє виявити їх вплив на масу автомобіля, витрати паливно-мастильних матеріалів і кількість шкідливих викидів в атмосферу.

Виділено основні тенденції розвитку металевих конструкційних матеріалів; розглянуто підхід до оцінки матеріалів за критерієм втіленої енергії.

Акцентовано увагу, що розвиток інноваційних технологій створення нових металевих конструкційних матеріалів є важливим кроком до переходу на екологічно чистий транспорт в країні.

Обґрунтовано використання шаруватих металевих композиційних матеріалів в якості матеріалів з високою в'язкістю руйнування.

Проведено аналіз основних марок конструкційних вуглецевих сталей, який дозволяє коректно формулювати вимоги, що пред'являються до сталей певних груп автомобільних деталей, а також виконувати вибір матеріалів для виготовлення та ремонту деталей автомобілів з урахуванням властивостей сталей, призначення та умов роботи деталей автомобіля.

Виділено напрями та проблеми металевих конструкційних матеріалів для деталей автомобілів.

Запропоновано шаруваті металеві композиційні матеріали, отримані зварюванням вибухом, в якості матеріалів з високою в'язкістю руйнування.

Висновки

При виконанні наукової роботи використані опубліковані дані, а також матеріали власних досліджень.

Сьогодні 99,8 % світового автомобільного транспорту працює на двигунах внутрішнього згорання. Незважаючи на розвиток електромобілів і гібридів, до 2040 року 85...90 % транспортної енергії буде надходити від звичайного рідкого палива, яке приводить у дію двигуни внутрішнього згорання. Відомо, що ДВЗ під час роботи спалює велику кількість автомобільного палива та повітря, створює значний хімічний та тепловий тиски на навколишнє середовище.

Актуальними тенденціями розвитку автомобільного транспорту є декарбонізація, екологічна безпека та ресурсозбереження.

А одним з перспективних напрямів розвитку автомобільного транспорту, який дозволяє вирішувати поставлені завдання, є розробка нових металевих конструкційних матеріалів та технології виготовлення деталей автомобілів.

Актуальність і важливість проблеми вибору та використання конструкційних матеріалів для деталей автомобілів обумовлені впливом матеріалів на масу автомобіля, міцність, надійність, корозійну стійкість, витрати паливно-мастильних матеріалів і кількість шкідливих викидів в атмосферу.

В роботі виконано аналіз сучасного стану, основних напрямів розвитку та проблем металевих конструкційних матеріалів для деталей автомобілів.

Виконана класифікація і систематизація металевих конструкційних матеріалів, які використовуються для виробництва або ремонту деталей автомобілів.

Проведено аналіз марок вуглецевих конструкційних сталей, властивостей та областей їх використання для виготовлення та ремонту деталей автомобілів.

Досліджена практика використання сталей, чавунів і кольорових сплавів на прикладах деяких деталей автомобілів: блоків циліндрів

ДВЗ, гільз циліндрів, колінчатих валів, розподільних валів, шатунів, підшипників, пружин.

Виконано дослідження сучасних напрямів розвитку конструкційних матеріалів для деталей автомобілів: високоміцних сталей, алюмінієвих сплавів, наноматеріалів, композиційних матеріалів.

Важливими властивостями високоміцних сталей є висока міцність та жорсткість, які дозволяють не тільки значно підвищити міцність і жорсткість деталей, порівняно зі звичайними сталями, але й ефективно поглинати енергію удару при ДТП, що захищає пасажирів та знижує ризик їхнього травмування.

Важливими властивостями алюмінієвих сплавів є менша (порівняно зі сталями) густина, висока корозійна стійкість.

Сьогодні активно розробляються наноматеріали, які мають унікальні властивості, наприклад, високу міцність, малу густину та велику зносостійкість. В роботі наведено приклади використання наноматеріалів на автомобільному транспорті.

Перспективними матеріалами є композиційні матеріали, які дозволяють регулювати їхні властивості за рахунок вибору компонентів, їх концентрації, розмірів, форми, орієнтації та міцності з'єднання одне з одним.

Досліджено можливості шаруватих композиційних матеріалів, що отримані вибухом, змінювати в'язкість руйнування.

Викладений матеріал дозволяє коректно формулювати вимоги, що пред'являються до сталей певних груп автомобільних деталей.

Проведений аналіз полегшує вибір матеріалів з урахуванням умов їх роботи, призначення та ряду інших факторів.

Використання сучасних конструкційних матеріалів для виробництва деталей автомобілів дозволяє зменшити вагу автомобіля, підвищити паливну ефективність, зменшити кількість викидів CO₂, підвищити безпеку, зменшити витрати на обслуговування автомобілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буренніков Ю. А., Сивак І. О., Сухоруков С. І. *Нові матеріали та композити* : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2020. Ч. 1. 135 с. URL: https://bmi.vntu.edu.ua/bioart/program/NM_lect.pdf
2. Дорошенко В. С., Клименко С. І. Про оптимальний вибір ливарних сплавів для автопромисловості з урахуванням втіленої енергії. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024* : матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 25-26 квіт. 2024 р.). Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 138–143. URL: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2024/06/conferenziya_2024.pdf
3. Дорошенко В. С., Калужний П. Б. Ізотермічне гартування залізовуглецевих сплавів, суміщене з їх виливанням. *Металознавство та обробка металів*. 2024. Т. 30. № 1. С. 47–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2024.01.047>
4. ДСТУ 2651:2005. *Сталь вуглецева звичайної якості. Марки*. [Чинний від 2006-09-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 24 с.
5. ДСТУ 3833-98. *Прутки, штаби та мотки з інструментальної нелегованої сталі. Загальні технічні умови*. [Чинний від 2001-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2000. 58 с.
6. ДСТУ 3925-99. *Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки. З поправками (ІПС № 9-2002, ІПС № 8-2006)*. [Чинний від 2000-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1999. 25 с.
7. ДСТУ 7809:2015. *Прокат сортовим, каліброваним зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови*. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 25 с.
8. ДСТУ 8429:2015. *Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови*. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 19 с.
9. 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.
10. ДСТУ 9029:2020. *Сталь аустенітна. Методи визначення вмісту феритної фази в прутках*. [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.
11. ДСТУ EN 10020:2007. *Сталі. Визначення й класифікація (EN 10020:2000, IDT)*. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2009.
12. ДСТУ ISO 148-1:2022. *Металеві матеріали. Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Частина 1. Метод випробування (ISO 148-1:2016, IDT)*. [Чинний від 2022-10-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 28 с.
13. Кривцун І. В., Квасницький В. В., Максимов С. Ю., Єрмолаєв Г. В. *Спеціальні способи зварювання* : підручник / за заг. ред. Б. Є. Патона. Миколаїв : НУК, 2017. 346 с. URL: https://www.researchgate.net/profile/Gennadii-Yermolaiev/publication/321796647_SPECIALNI_SPOSOBI_ZVARUVANNA/links/5a32349b458515afb6555f62/SPECIALNI-SPOSOBI-ZVARUVANNA.pdf
14. Линник І. Е., Лежнева О. І., Дорожко Є. В., Вакуленко К. Є., Соколова Н. А., Афанасьєва І. А. *Екологічні аспекти автотранспортного комплексу* : монографія. Харків : Смугаста типографія, 2020. 194 с.
15. Ляшук О. Л., Плекан У. М., Цьонь О. П., Гевко Б. Р. Розвиток технологій гібридних силових установок автомобілів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), Ч. І. С. 139–146. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.139-146](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.139-146)
16. 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>
17. Олішевська В. Є., Бас К. М., Кривда В. В. *Конструкційні та експлуатаційні матеріали в автомобільній галузі* : метод. рек. до практичних занять за темою «Мікроструктурний аналіз і властивості вуглецевих сталей» для студентів спеціальності 274 Автомобільний транспорт. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 22 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/161278>
18. 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>
19. Олішевська В. Є., Іванова Г. П., Олішевський Г. С. Переробка свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів: виклики та перспективи. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 1(109). С. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/325342>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

20. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С., Іванова Г. П. Акумуляторні батареї електромобілів: технічні та екологічні аспекти. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2(110). С. 35–49.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332155>
21. Павленко В. М., Сухомлін О. О. Роль сучасних матеріалів у забезпеченні безпеки транспортних засобів. *Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт* : зб. тез міжнародної науково-практичної конференції до Дня автомобіліста та дорожника (Харків, 22-23 жовт. 2024 р.). Харків : ХНАДУ, 2024. С. 101–104.
URL: https://af.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F-AUTOMOBILE/Конференції/2024/_тези24.pdf
22. Паливода О. М. Стратегії розвитку транспортних підприємств України в умовах Європейської інтеграції та війни. *Бізнес Інформ*. 2023. № 8. С. 185–192.
DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-8-185-192>
23. Прокопович І. В. *Металознавство* : навч. посіб. Одеса : Екологія, 2020. 308 с.
24. Рудасьов В. Б., Якубовський О. М., Головіна О. В. Сучасні тенденції застосування сталей підвищеної міцності в автомобілебудуванні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33(72). № 1. С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/03>
25. Собкевич О. В., Шевченко А. В., Русан В. М., Белашов С. В., Жураковська Л. А., Жаліло Я. А. *Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України* : аналітична доповідь. Київ : НІСД, 2024. 104 с. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03>
26. Холяк В. В., Владимирський І. А. *Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів* : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 270 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62087>
27. Dawson S., Ferrarese A., Marquard R. Cast Iron Cylinder Blocks: Same Weight as Aluminum; Lower Emissions. *SAE Technical Paper*. 2023-01-0439. 2023. DOI: <https://doi.org/10.4271/2023-01-0439>
28. Keough J. The perspective of life cycle analysis in market decisions. *Modern Casting*. 2023. October. P. 34–37. URL: <https://cdn.coverstand.com/55001/804496/89f24fa87b37761cd433c2e3317adc9fa3957242.1.pdf>
29. 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>
30. Olishavska S. O., Olishavska V. Ye. Research of impact viscosity of composite materials. *Наукова весна 2025* : матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 26-28 березня 2025 р.). Дніпро : НТУ ДП, 2025. С. 50–51.
URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2025.pdf
31. Pivnyak G., Olishavska V., Olishavskiy H., Lutsenko I., Lysenko A. Comprehensive research of electric cars development and related infrastructure in Ukraine. *Physical & Chemical Geotechnologies* : 8th International Conference E3S Web of Conferences. 09 September 2024. Vol. 567. 01025.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701025>

V. E. OLISHEVSKA^{1*}, H. S. OLISHEVSKIY², H. P. IVANOVA³

^{1*}Dep. of Automobiles and Automobile Economy, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail olishavska.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

²Dep. of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 56 51 830, e-mail Olishavskiyi.h.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

³Dep. 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

Metal Structural Materials for the Production and Repair of Automobile Parts: Practice and Prospects

Purpose. The main purpose of the work is to review and systematize metal structural for the production and repair of automobile parts, as well as analyze modern trends in their further development. **Methodology.** The main problems associated with metal structural materials today include the following: high density of materials, which increases the mass of the car, the consumption of fuel and lubricants and the amount of harmful emissions into the atmosphere; the need to ensure the strength and reliability of automobile structures; the need to ensure passive and active safety; the susceptibility of materials to corrosion, the scale of which can be judged by the fact that approxi-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197>

© В. Є. Олішевська, Г. С. Олішевський, Г. П. Іванова, 2025

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

mately 20 % of the steel produced in the world is used to cover losses from corrosion; the task of reducing the environmental load on the environment; the development of new materials that meet modern requirements; the selection and justification of structural materials for car parts; preparation for post-war reconstruction, the need to save resources. 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, impact toughness testing). **Findings.** The current state and problems associated with metal structural materials are analyzed; it is shown that structural materials significantly affect the mass of the car, strength, reliability, corrosion resistance, fuel and lubricant consumption and the number of harmful emissions into the atmosphere. The analysis of structural carbon steels allows us to correctly formulate the requirements for steels of certain groups of automotive parts, and to select materials for the manufacture or repair of automobile parts, taking into account the properties of the material, purpose and operating conditions of automotive parts. Modern trends in the development of new materials for road transport are considered: high-strength steels, aluminum alloys, nanomaterials, composite materials. The possibilities of creating layered composite materials by explosion welding are investigated, and impact toughness tests are conducted. **Originality.** A comprehensive analysis of the problems of metal structural materials has been carried out, which allows us to identify their impact on the mass of the car, the consumption of fuel and lubricants and the number of harmful emissions into the atmosphere. The main trends in the development of metal structural materials have been highlighted; the approach to assessing materials according to the criterion of embodied energy has been considered. It is emphasized that the development of innovative technologies for creating new metal structural materials is an important step towards the transition to environmentally friendly transport in the country. The use of layered metal composite materials as materials with high fracture toughness has been substantiated. **Practical value.** An analysis of the main grades of structural carbon steels has been carried out, which allows us to correctly formulate the requirements for steels of certain groups of automotive parts, as well as to select materials for the manufacture and repair of automotive parts, taking into account the properties of steels, the purpose and operating conditions of automotive parts. The directions and problems of metal structural materials for automotive parts have been highlighted. Layered metal composite materials obtained by explosion welding have been proposed as materials with high fracture toughness.

Keywords: steels; composite materials; material classification; strength; impact strength; automotive parts

REFERENCES

1. Buriennikov, Yu. A., Syvak, I. O., & Sukhorukov, S. I. (2020). *Novi materialy ta kompozyty : konspekt leksii* Ch. 1. Vinnytsia: VNTU. URL: https://bmi.vntu.edu.ua/bioart/program/NM_lect.pdf (in Ukrainian)
2. Doroshenko, V. S., & Kaliuzhnyi, P. B. (2024). Isothermal hardening of iron-carbon alloys combined with their casting. *Metal Science and Treatment of Metals*, 30(1), 47-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2024.01.047> (in Ukrainian)
3. Doroshenko, V. S., & Klymenko, S. I. (2024, April). Pro optymalnyi vybir lyvarnykh splaviv dlia avtopromyslovosti z urakhuvanniam vtilenoi enerhii. *Novi materialy i tekhnolohii v mashynobuduvanni-2024 : materialy XVI mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (pp. 138-143). Kyiv, Ukraine. URL: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2024/06/conferenziya_2024.pdf (in Ukrainian)
4. *Stal vuhletseva zvychnoi yakosti. Marky, 24 DSTU 2651:2005*. (2006). (in Ukrainian)
5. *Prutky, shtaby ta motky z instrumentalnoi nelehovanoi stali. Zahalni tekhnichni umovy, 58 DSTU 3833-98*. (2000). (in Ukrainian)
6. *Chavun z kuliastym hrafitom dlia vylyvkiv. Marky. Z poprvkamy (IPS № 9-2002, IPS № 8-2006), 25 DSTU 3925-99*. (1999). (in Ukrainian)
7. *Prokat sortovym, kalibrovanyim zi spetsialnym obroblenniam poverkhni z vuhletsevoi yakisnoi konstruktssii-noi stali. Zahalni tekhnichni umovy, 25 DSTU 7809:2015*. (2016). (in Ukrainian)
8. *Prokat iz resorno-pruzhynnoi vuhletsevoi ta lehovanoi stali. Tekhnichni umovy, 19 DSTU 8429:2015*. (2016). (in Ukrainian)
9. *Vylyvky iz siroho chavunu z plastynchastym hrafitom. Zahalni tekhnichni umovy, 11 DSTU 8833:2019*. (2019). (in Ukrainian)
10. *Stal austenitna. Metody vyznachennia vmistu ferytnoi fazy v prutkakh, DSTU 9029:2020*. (2021). (in Ukrainian)
11. *Stali. Vyznachennia y klasyfikatsiia, DSTU EN 10020:2007 (EN 10020:2000, IDT)*. (2009). (in Ukrainian)
12. *Metalevi materialy. Vyprobuvannia na udarnyi vyhyn za Sharpi na maiatnykovomu kopri. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia (ISO 148-1:2016, IDT), 28 DSTU ISO 148-1:2022*. (2022). (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Krivtsun, I. V., Kvasnytskyi, V. V., Maksymov, S. Yu., & Yermolaiev, G. V. (2017). *Spetsialni sposoby zvarivannia* : pidruchnyk. (Patona, B. Ye. (Ed.)). Mykolaiv : NUK.
URL: https://www.researchgate.net/profile/Gennadii-Yermolaiev/publication/321796647_SPECIALNI_SPOSOBI_ZVARUVANNA/links/5a32349b458515afb6555f62/SPECIALNI-SPOSOBI-ZVARUVANNA.pdf (in Ukrainian)
14. Lynnyk, I. E., Lezhneva, O. I., Dorozhko, Ye. V., Vakulenko, K. Ye., Sokolova, N. A. & Afanas'yeva, I. A. (2020). *Ekolohichni aspekty avtotransportnoho kompleksu*: monohrafiia. Kharkiv: Vydavnytstvo «Smuhasta typohrafiya» (in Ukrainian)
15. Lyashuk, O. L., Plekan, U. M., Tson, O. P., & Gevko, B. R. (2023). Development Technologies of Cars Hybrid Power Plants. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 8(39), P. 1, 139-146.
DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.139-146](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.139-146) (in Ukrainian)
16. Mytko, M. V., Shylina, O. P., & Tsymbal, S. V. (2022). *Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Orhanizatsiia samostiinoi ta praktychnoi roboty* : navch. posib. Vinnytsia : VNTU.
URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/35995> (in Ukrainian)
17. Olishevska, V. Ye., Bas, K. M., & Krivda, V. V. (2022). *Konstruktsiini ta ekspluatatsiini materialy v avtomobilnii haluzi : metod. rek. do praktychnykh zaniat*. Dnipro: NTU «DP».
URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/161278> (in Ukrainian)
18. Olishevska, V. Ye., Bas, K. M., & Krivda, V. V. (2025). *Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Praktykum* : navch. posib. Dnipro: NTU «DP». URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985> (in Ukrainian)
19. Olishevska, V. E., Ivanova, H. P., & Olishevskiy, H. S. (2025). Recycling Lead Acid Car Batteries: Challenges and Prospects. *Science and Transport Progress*, 1(109), 142-151.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/325342> (in Ukrainian)
20. Olishevska, V. E., Olishevskiy, H. S., & Ivanova, H. P. (2025). Electric Vehicle Batteries: Technical and Environmental Aspects. *Science and Transport Progress*, 2(110), 35-49.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332155> (in Ukrainian)
21. Pavlenko V. M., & Suxomlin O. O. (2024, October) Rol suchasnykh materialiv u zabezpechenni bezpeky transportnykh zasobiv. In *Modern automotive industry, transport and road infrastructure '2024 (MAITRI 2024) : book of abstracts International Scientific and Practical Conference until the Day of Workers of Automobile Transport and Road Workers* (pp. 101-104). Kharkiv.
URL: https://af.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F-AUTOMOBILE/Конференції/2024/_тези24.pdf (in Ukrainian)
22. Palyvoda, O. M. (2023). Growth Strategies for Transport Enterprises of Ukraine in the Conditions of European Integration and War. *Business Inform*, 8, 185-192.
DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-8-185-192> (in Ukrainian)
23. Prokopovych, I. V. (2020). *Metaloznavstvo* : navch. posib. Odesa: Ekolohiia. (in Ukrainian)
24. Rudasov, V. B., Yakubovskiy, O. M., & Holovina, O. V. (2022). Suchasni tendentsii zastosuvannia stalei pidvyshchenoi mitsnosti v avtomobilebuduvanni. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky*. Vol. 33(72), 1, 12-18. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/03> (in Ukrainian)
25. Sobkevych, O. V., Shevchenko, A. V., Rusan, V. M., Bielashov, Ye. V., Zhurakovska, L. A., & Zhalilo, Ya. A. (2024). *Priorytety rozvytku realnoho sektora v umovakh viiny ta povoiennoho vidnovlennia ekonomiky Ukrainy*: analitychna dopovid. Kyiv: NISD. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03> (in Ukrainian)
26. Kholiavko, V. V., & Vladymyrskyi, I. A. (2023). *Mekhanichni vlastyvoli ta konstruktsiina mitsnist materialiv : pidruchnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62087> (in Ukrainian)
27. Dawson, S., Ferrarese, A., & Marquard, R. (2023). Cast iron cylinder blocks: Same weight as aluminum; Lower emissions. *SAE Technical Paper*, 2023-01-0439. DOI: <https://doi.org/10.4271/2023-01-0439> (in English)
28. Keough, J. (2023, October). The perspective of life cycle analysis in market decisions. *Modern Casting*, 34-37. Retrieved from <https://cdn.coverstand.com/55001/804496/89f24fa87b37761cd433c2e3317adc9fa3957242.1.pdf> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

29. 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)
30. Olishevskaya, S. O., & Olishevskaya, V. Ye. (2025, March). Research of impact viscosity of composite materials. *Naukova vesna 2025 : materialy XV mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii aspirantiv ta molodykh vchenykh* (pp. 50-51). Dnipro, Ukraine.
URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2025.pdf (in English)
31. Pivnyak, G., Olishevskaya, V., Olishevskiy, H., Lutsenko, I., & Lysenko, A. (2024). Comprehensive research of electric cars development and related infrastructure in Ukraine. *Physical & Chemical Geotechnologies: 8th International Conference E3S Web of Conferences, 567*, 01025.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701025> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.05.2025

Прийнята до друку: 18.09.2025

УДК 614.21:[699.86:697.14]-048.34

А. В. РАДКЕВИЧ^{1*}, М. М. ЛЯХОВЕЦЬКА-ТОКАРЄВА^{2*}, С. В. ГАВРИЛЮК^{3*}

^{1*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

^{2*}Каф. «Опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання», Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (097) 923 47 73, ел. пошта lyakhovetsky-tokareva@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-0338-4930

^{3*}Інженер-проектувальник систем ОВіК та ВК Climatech, вул. Набережна Заводська, 44, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (096) 718 89 17, ел. пошта s.v.gavr28@gmail.com, ORCID 0009-0001-6827-7722

Оптимізація енергоефективності будівлі багатопрофільного медичного центру

Мета. Підвищення теплової ефективності будівлі багатопрофільного медичного центру шляхом оптимізації архітектурно-планувальних рішень, врахування кліматичних умов та вдосконалення параметрів інженерних систем. Будівля розглядається як єдина енергосистема, ефективність якої визначається взаємодією зовнішніх і внутрішніх чинників. **Методика.** Базується на математичному моделюванні тепломасообміну, аналізі кліматичних даних та розрахунках енерговитрат відповідно до чинних нормативів. У роботі враховано вплив інсоляції, вітрового навантаження, температури зовнішнього повітря, інфільтрації та теплозахисту огорожувальних конструкцій. Запропоновано показник ефективності проектного рішення, що оцінює його відхилення від енергетично оптимального варіанту. **Результати.** Отримано на прикладі багатопрофільного медичного центру в місті Дніпрі. Проведено аналіз інсоляції за орієнтацією фасадів, розраховано теплові надходження через прозорі й непрозорі елементи, визначено теплові навантаження на опалення й охолодження. Враховано сезонну змінність клімату, теплоємність матеріалів і режим експлуатації. Дослідження підтвердило, що орієнтація будівлі, площа скління, ефективність вентиляційної системи та якість інженерного обладнання істотно впливають на енергоспоживання. Запропоновано методику вибору габаритів будівлі з урахуванням місцевих кліматичних даних і потенціалу сонячної енергії. **Наукова новизна.** Полягає в обґрунтуванні системного підходу до енергоефективного проектування, що поєднує кліматичні чинники, архітектурні обмеження та теплотехнічні характеристики в єдину модель. Запропоновано коефіцієнт, що оцінює проектне рішення за рівнем його енергоефективності. **Практична значимість.** Полягає у формуванні рекомендацій щодо зменшення енергоспоживання. Запропоновані рішення дозволяють знизити теплове навантаження на інженерні системи на 20...25 %, скоротити експлуатаційні витрати та підвищити комфорт. У досліджуваному об'єкті впроваджено систему вентиляції з рекуперацією тепла (до 85 %) і тепловий насос із коефіцієнтом ефективності (COP) 3,5, що забезпечило значне зниження енергоспоживання. Результати підтверджують ефективність поєднання архітектурного проектування з сучасним інженерним обладнанням та кліматичною адаптацією. Методика може бути використана для широкого спектра громадських і житлових будівель. **Висновки.** Комплексне енергоефективне проектування потребує інтеграції архітектури, енергетики та кліматології. Запропонований підхід дозволяє формувати проекти, які не лише відповідають нормативам, а й забезпечують мінімальне енергоспоживання в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: енергоефективність; тепловий баланс; кліматичні умови; теплопередача; інсоляція; вентиляція

Вступ

Мета спорудження енергоефективних будівель полягає в раціональному використанні енергоресурсів, що витрачаються на їхнє функціонування. Це досягається завдяки впровадженню сучасних інноваційних рішень, які є технічно здійсненними, економічно виправданими, екологічно безпечними та соціально прийнятними без порушення при цьому звич-

ного ритму життя. Під час вибору енергозберігаючих технологій пріоритет надається тим технічним рішенням, які одночасно покращують мікроклімат у приміщеннях і зменшують негативний вплив на довкілля.

Процес проектування енергоефективної будівлі повинен базуватися на системному підході, в якому будівля розглядається як цілісна енергетична система. Розгляд окремих інноваційних рішень як незалежних одне від одного

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

суперечить принципам системності й може знизити загальну ефективність проекту. Системний аналіз у проектуванні таких споруд включає три основні етапи [1]:

1) створення математичної моделі процесів тепломасообміну в будівлі, тобто представлення цих процесів у математичній формі;

2) визначення цільової функції, що включає встановлення обмежень і формулювання задачі оптимізації відповідно до поставленої мети (наприклад, мінімізація енергоспоживання на опалення, зменшення необхідної потужності

обладнання, скорочення річних витрат на кліматизацію тощо);

3) розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі з урахуванням заданих умов і обраних критеріїв ефективності.

Згідно з принципами системного підходу, у процесі проектування енергоефективної будівлі доцільно розглядати дві окремі, але взаємопов'язані енергетичні підсистеми (рис. 1): 1) зовнішнє середовище, яке виступає джерелом енергії; 2) саму будівлю, що функціонує як цілісна енергетична система.



Рис. 1. Енергетичні підсистеми будівлі

Fig. 1. Energy subsystems of a building

Детальний аналіз першої підсистеми дозволяє оцінити енергетичний потенціал навколишнього клімату та обрати ефективні способи його залучення для забезпечення будівлі теплом або холодом [2]. У свою чергу, дослідження другої підсистеми дає змогу охарактеризувати будівлю з точки зору її архітектурно-конструктивних, теплотехнічних та енергетичних параметрів як єдиного узгодженого механізму [1, 2].

Мета

Метою дослідження є оптимізація енергоефективності будівлі багатопрофільного медичного центру в місті Дніпрі за рахунок інтегровано

ваного підходу до вибору архітектурно-планувальних та інженерних рішень з урахуванням локальних кліматичних умов. Будівля розглядається як цілісна енергетична система, ефективність якої визначається взаємодією зовнішніх факторів (сонячна інсоляція, температура повітря, вітер) та внутрішніх технічних параметрів (теплові характеристики огорожень, системи вентиляції, теплові насоси).

У процесі практичного проектування енергоефективної будівлі вибір найкращого поєднання взаємопов'язаних інноваційних архітектурно-планувальних й інженерних рішень часто обмежується певними фіксованими умовами, так званими «дисциплінуючими обмеженнями». Ці умови визначаються ще на початкових

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

етапах і не підлягають зміні – наприклад, це може бути встановлена кількість поверхів або довжина будівлі.

У таких умовах проєктувальники вирішують задачу оптимізації в межах заданих обмежень, прагнучи досягти найкращого результату з урахуванням наявних обмежень [3].

Методика

У контексті наявності обмежень, але прагненні досягнути найкращого результату при вирішенні задачі, доцільно запровадити коефіцієнт проєктного рішення η . Коефіцієнт вводиться для відображення відхилення запроєктованої будівлі від максимально ефективного в теплотехнічному плані варіанту:

$$\eta = \frac{W_{win}}{W}, 0 < \eta \leq 1, \quad (1)$$

де W_{win} – мінімальні витрати теплової енергії для підтримання режиму в будівлі, яка є зразком максимальної теплоефективності, Вт; W – фактичні теплові витрати на забезпечення температурного режиму у варіанті будівлі, що взята в якості основи для проєктування, Вт.

Виходячи з рівняння (1) найвищий рівень теплової ефективності буде досягнуто, коли коефіцієнт дорівнює одиниці ($\eta = 1$).

Відповідно до уявлення будівлі як єдиної енергетичної системи, трьома основними енергетично взаємопов'язаними підсистемами показник теплової ефективності проєктного рішення може бути записаний як:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3; \\ 0 < \eta_i \leq 1, i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

де η_1 – показник теплової ефективності, який характеризує рівень оптимального врахування кліматичних умов зовнішнього середовища; η_2 – показник, що відображає ефективність у виборі системи, що відповідає за підтримання теплового режиму в будівлі; η_3 – показник, який оцінює ефективність теплозахисту огорожувальних конструкцій з точки зору оптимального проєктного рішення [4].

Під час проєктування будівлі архітектор прагне максимально ефективно використати сприятливі особливості зовнішнього клімату та

зменшити його негативний вплив на тепловий баланс споруди [6].

У свою чергу, інженер зосереджується на створенні кліматичної системи, яка забезпечує комфортні умови в приміщеннях при мінімальному споживанні енергії.

Природно постає запитання: наскільки ефективно архітектор і інженер реалізували свої завдання в контексті енергоефективного проєктування?

Суб'єктивна оцінка результату навряд чи задовольнить вимогливого замовника, оскільки він очікуватиме на точну кількісну характеристику досягнутого рівня ефективності. Одним із таких об'єктивних показників може бути питома тепла характеристика будівлі, розрахована для певного кліматичного періоду.

Цей параметр дозволяє порівнювати проєкт із наявними аналогами, але не дає відповіді на ключове питання: чи можливо було досягти кращого результату і наскільки?

Очевидно, що ідеальним результатом роботи архітектора та інженера є будівля, яка досягає максимальної енергоефективності, тобто забезпечує необхідний мікроклімат із мінімальними енергетичними витратами [7].

Саме сучасні методи математичного моделювання та системного аналізу дозволяють знаходити оптимальні архітектурні й інженерні рішення при проєктуванні таких споруд.

Характеризуватимемо енергетичну ефективність будівлі з оптимальними архітектурними та інженерними рішеннями через витрати енергії на її кліматизацію, позначаючи цю величину як W_{win} . Цей критерій, без сумніву, задовольнить вимоги замовника, оскільки дозволить йому оцінити, наскільки успішно було обрано виконавців – архітектора та інженера, а також наскільки ефективно вони врахували його побажання щодо мінімізації витрат на кліматизацію будівлі.

Величина η змінюється в межах від 0 до 1. Чим ближче η до 1, тим більше архітектурні та інженерні рішення наближаються до оптимальних і тим вище рівень майстерності архітектора та інженера.

Згідно з системним підходом до проєктування енергоефективної будівлі величину η можна записати так:

$$\eta = \eta_E \cdot \eta_A; \quad (3)$$

$$\eta_A = \frac{Q_{\min}^A}{Q}; \quad (4)$$

$$\eta_E = \frac{Q_{\min}^E}{Q}, \quad (5)$$

де Q_{\min}^A – обсяг енерговитрат на кліматизацію будівлі за умов оптимальних архітектурних рішень; Q_{\min}^E – обсяг енерговитрат на кліматизацію будівлі за умов оптимальних інженерних рішень.

У такому випадку, показник η_A можна розглядати як індикатор професійної майстерності архітектора, а η_E – як показник майстерності інженера [2–4].

Результати

Відомо, що інтенсивність сонячної радіації, швидкість і напрямок вітру, а також температура зовнішнього повітря значно варіюються залежно від географічного розташування, оро-

графічних особливостей, мікрорельєфу місцевості та пори року [5].

Вплив зовнішнього клімату на огорожувальні конструкції будівлі доцільно описувати за допомогою метеорологічного градієнта, який враховує напрямок, величину та частоту прояву кліматичних чинників.

Статистичний аналіз зовнішнього клімату як сукупності залежних або незалежних випадкових величин свідчить, що для кожної місцевості в певні характерні періоди часу формується свій специфічний метеорологічний градієнт. Він чинить спрямований вплив на тепловий баланс приміщень із різною орієнтацією, тому в результаті взаємодії вітру, сонячного випромінювання та температури повітря приміщення, що зорієнтовані по-різному, зазнають істотно відмінних тепловтрат або теплонадходжень.

На рис. 2 подано добові значення прямої сонячної радіації для поверхонь різної орієнтації при широті 48° північної широти.

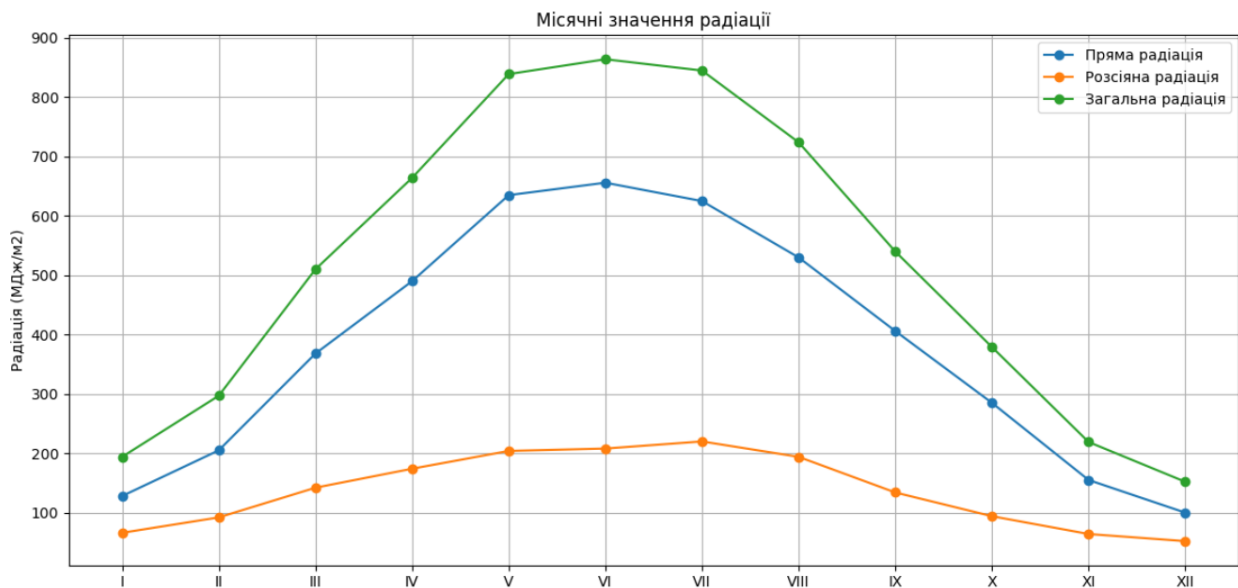


Рис. 2. Добові значення сонячної радіації на для поверхонь різної орієнтації

Fig. 2. Daily values of solar radiation on surfaces of different orientations

Статистичні дослідження показують зміни цих добових сум і демонструє значні сезонні коливання, зокрема спостерігається обернено пропорційна залежність між радіацією для східної та південної орієнтацій.

Враховуючи закономірності надходження сонячної енергії, а також зважаючи на актуаль-

ність енергозбереження в умовах сучасної енергетичної ситуації, ефективне використання сонячного тепла у тепловому балансі будівлі суттєво знижує експлуатаційні витрати [8].

Це спонукало провідних архітекторів світу розробити чіткі принципи проектування.

По-перше, в сучасному індустріальному будівництві багатоповерхових споруд із великими площами застосування та легкими огорожувальними конструкціями не можна сліпо наслідувати підходи архітекторів минулого.

По-друге, кожен архітектор має усвідомлювати, що кожен фасад будівлі потребує індивідуального підходу, який залежить від положення сонця, точно розрахованого теплового навантаження та вимог до природного освітлення.

Проте розроблені архітекторами правила базуються переважно на практичному досвіді, а не на точних математичних розрахунках, які б враховували закономірності впливу сонячної радіації на тепловий баланс будівель.

Дослідження загалом відображають типову сезонну динаміку сонячної радіації для помірного поясу, але значення дещо завищені порівняно з типовими даними для міста Дніпра, особливо для загальної радіації влітку (850 мВт/м² проти 600...700 Вт/м²) і взимку (200 мВт/м² проти 50...100 Вт/м²).

Пряма і розсіяна радіація на графіку (див. рис. 1) влітку близькі до очікуваних значень для міста Дніпра, але взимку загальна радіація завищена, що може свідчити про те, що графік побудований для регіону з меншою хмарністю або південніше, ніж місто Дніпро.

Завдання оптимального врахування позитивного впливу клімату та нейтралізації негативного ефекту на будівлю слід розглядати в двох напрямках:

1) розробка методики обробки кліматичних даних для потреб будівельного проектування;

2) вибір орієнтації та розмірів будівлі, що найкраще використовують позитивний вплив і зменшують негативний ефект зовнішнього клімату на її огороження.

Оптимізація теплоенергетичного впливу зовнішнього клімату на тепловий баланс будівлі можлива завдяки правильному вибору форми будівлі, розташуванню та площі світлових прорізів, а також регулюванню фільтраційних потоків.

Наприклад, обраний тип форми, орієнтація та розміри будівлі дозволяють зменшити вплив сонячної радіації на оболонку будівлі в теплу пору року, що, у свою чергу, знижує потребу в охолодженні.

Зовнішні огорожувальні конструкції захищають приміщення від впливу зовнішніх атмо-

сферних факторів, а системи опалення та вентиляції підтримують бажаний внутрішній клімат.

Загалом, можна сказати, що вплив сонячної радіації на тепловий баланс приміщення в зимовий період є позитивним, а влітку – негативним.

Вплив вітру, з іншого боку, є негативним в холодну пору року, а в теплу пору року його ефект може бути негативним вдень і позитивним вночі.

Важливим є той факт, що кількісне вплив сонячної радіації та вітру на тепловий баланс будівлі при однаковій загальній корисній площі або об'ємі залежить від її орієнтації та розмірів.

Методологія проектування систем опалення, вентиляції та кондиціонування базується на розрахунках теплових і повітряних балансів будівлі для характерних сезонних періодів [9].

Методика вибору орієнтації та габаритів будівлі передбачає врахування кліматичних характеристик району забудови, а також заданих параметрів – загальної корисної площі будівлі та висоти поверхів.

На сьогодні в Україні діють національні нормативи з енергоефективності [10], які встановлюють вимоги до енергоефективності нових будівель, а також при реконструкції існуючих.

Сумарне значення узагальненого коефіцієнта теплопередачі трансмісією, Вт/К, розраховують за формулою [11]:

$$H_{tr,adj} = b_{tr,x} \cdot \sum_i A_i \cdot U_i, \quad (6)$$

де A_i – площа i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі, що виміряна за внутрішніми розмірами, включно з площею внутрішніх дверних та віконних укосів, м²; U_i – приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м²·К), що визначають згідно з [5, 7]; $b_{tr,x}$ – поправочний коефіцієнт.

Значення узагальненого коефіцієнта теплопередачі вентиляцією [12] визначають за формулами для опалення (6):

$$H_{Ve,adj,H} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot (q_{Ve,mn,H} \cdot b_{Ve,H} + q_{inf,mn,H}), \quad (7)$$

$$H_{Ve,adj,C} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot (q_{Ve,mn,C} \cdot b_{Ve,C} + q_{inf,mn,C}), \quad (8)$$

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

де $\rho_0 \cdot c_0$ – теплоємність одиниці об'єму повітря, що дорівнює 0,336 Вт·год/(м·К); $q_{Ve,mm,H}$ – усереднена за часом витрата повітря для вентиляції для опалення та для охолодження відповідно, м³/год; $q_{Ve,mm,C}$ – усереднена за часом витрата повітря для інфільтрації для опалення та для охолодження відповідно, м³/год; $b_{Ve,H}$, $b_{Ve,C}$ – температурний поправочний коефіцієнт, що коригує коефіцієнт теплопередачі вентиляцією.

Середнє значення теплонадходжень у приміщення визначається за формулою:

$$\Phi_{mm} = \sum \Phi_{int} \cdot N / \tau_{int}, \quad (9)$$

де N – графік використання, год/тиждень; τ_{int} – кількість годин в тижні, год.

Відповідно до п. 11.3 [5, 7], визначаються надходження сонячної інсоляції через огорожувальні конструкції:

$$E_{sol,K} = F_{sh,ob,K} \cdot A_{sol,K} \cdot I_{sol,K} - F_{r,K} \cdot \Phi_{r,K}, \quad (10)$$

де $F_{sh,ob,K}$ – зменшувальний коефіцієнт інсоляційного затінення для еквівалентної площі k -ої поверхні; $A_{sol,K}$ – площа інсоляції з визначеною орієнтацією та кутом нахилу для скління, непрозорих елементів та спеціальних елементів; $I_{sol,K}$ – значення середньомісячного надходження сонячної радіації на визначену поверхню з урахуванням орієнтації, Вт/м²; $F_{r,K}$ – додатковий коефіцієнт, який враховує зв'язок між будівлею та небосхилом, котрий приймається 1 – для даху, який не затінений, та 0,5 – для вертикальної стіни; $\Phi_{r,K}$ – тепловий потік за рахунок випромінювання в атмосферу, Вт.

В переважному випадку зменшувальний коефіцієнт інсоляції $F_{sh,ob,K}$ визначається за п.11.4.2 [5, 7], але в роботі відсутні розрахункові дані, тому відповідно до табл. 12 [5, 7] для вертикальної площині з нахилом 0 градусів дорівнює 1.

Площа інсоляції в залежності від орієнтації визначається як для прозорої, так і для непро-

зорої огорожувальної конструкції $F_{sh,ob,K}$ для прозорої конструкції визначається за формулою:

$$A_{sol,K} = F_{sh,gl} \cdot q_{sh,gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p}, \quad (11)$$

де $F_{sh,gl}$ – понижувальний коефіцієнт затінення рухомих засобів, за відсутності даних приймається рівним 1; $q_{sh,gl}$ – коефіцієнт пропускання сонячної інсоляції прозорою частиною конструкції; F_F – частка обрамленої площі, приймається рівною 0,3; $A_{w,p}$ – площа проекції прозорого елемента, виходячи з того що розрахунок буде вестись пофасадно, значення приймається рівною 1.

$$q_{sh,gl} = F_w \cdot q_n. \quad (12)$$

Для непрозорих огорожувальних конструкцій значення $A_{sol,K}$ визначається за формулою:

$$A_{sol,K} = \alpha_{S,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c, \quad (13)$$

де $\alpha_{S,c}$ – безрозмірний коефіцієнт поглинання сонячної інсоляції першим шаром огорожувальної конструкції, приймається за табл. 10 [14, 15]; R_{se} – поверхневий тепловий опір непрозорої частини, приймається рівним 0,043 м² К/Вт; U_c – коефіцієнт теплопередачі стіни згідно теплотехнічного розрахунку Вт/(м²К); A_c – площа непрозорих огорожувальних конструкцій, м².

Основні розрахункові показники теплових надходжень зведені у табл. 1.

Для розрахунку теплових надходжень сонячної інсоляції через прозорі та непрозорі огорожувальні конструкції визначається величина сонячного теплового потоку на вертикальну поверхню при помірній хмарності, дані взяті з [13] для міста Дніпра та занесені до табл. 2.

Після цього проводиться розрахунок теплових надходжень на вертикальні поверхні залежно від їх типу та орієнтації. Розрахунок здійснюється за формулами вище. Отримані результати представлені в табл. 3 та 4.

Показники теплових надходжень

Table 1

Heat gain indicators

Засклені елементи фасаду		Непрозорі елементи фасаду	
Понижувальний коефіцієнт затінення перешкодами для еквівалентної площі інсоляції k -ої поверхні, $F_{sh,ob,K}$	1	Безрозмірний коефіцієнт поглинання сонячної радіації непрозорою частиною, $\alpha_{S,c}$	0,7
Понижувальний коефіцієнт затінення для рухомих засобів, $F_{sh,gl}$	1	Тепловий зовнішній поверхневий опір непрозорої частини R_{se}	0,043
Загальний коефіцієнт пропускання сонячної енергії світлопрозорої частини елемента, $q_{sh,gl}$	0,522	Коефіцієнт теплопередачі непрозорої частини, U_c	0,149
Частка площі обрамлення, F_F	0,3	Площа проєкції непрозорої частини A_c	1
Площа проєкції заскленого елемента, $A_{w,p}$	1		
Еквівалентна площа інсоляції заскленого елемента оболонки $A_{sol,K}$		Еквівалентна площа інсоляції непрозорої частини оболонки будівлі, $A_{sol,K}$	
0,365		0,0045	

Далі визначається загальне значення теплового потоку через вікна та стіни, яке обчислюється шляхом додавання відповідних значень з урахуванням орієнтації.

Динамічні методи дозволяють моделювати термічний опір і теплоємність огорожувальних конструкцій, враховують надходження сонячної радіації та вплив внутрішніх джерел тепла в цих конструкціях.

У разі застосування стандартного методу такі динамічні характеристики враховуються опосередковано – шляхом введення додаткових поправочних коефіцієнтів.

Багатопрофільний медичний центр відноситься до категорії будівель дуже важких, через те, що зовнішні огороження мають товщину блоків газобетону 440 мм, а також між поверхами вкладається залізобетонна плита пере-

риття. Виходячи з цього, згідно табл. 15 [14], теплова інерція будівлі становить

$$C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тоді внутрішню теплоємність будівлі можна визначити за формулою:

$$C_m = C \cdot A_f. \quad (14)$$

Тоді часова константа визначається за формулою для режиму опалення:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}}. \quad (15)$$

Для режиму охолодження:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj} + H_{ve,extra,adj}}. \quad (16)$$

Таблиця 2

Сонячна радіація Вт/м² (вертикальна поверхня)

Table 2

Solar radiation W/m² (vertical surface)

Період	Кількість днів	Кількість годин	Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Січень	31	744	13	13	21	37	50	40	25	13
Лютий	28	672	23	24	36	58	72	62	38	24
Березень	31	744	31	38	57	79	91	83	61	39
Квітень	30	720	40	56	81	97	99	94	78	55
Травень	31	744	55	81	108	112	102	110	101	79
Червень	30	720	67	94	119	114	98	113	112	90
Липень	31	744	61	87	116	115	101	112	111	86
Серпень	31	744	44	69	108	118	111	117	96	68
Вересень	30	720	29	46	81	109	122	110	76	46
Жовтень	31	744	18	22	46	77	95	77	44	22
Листопад	30	720	10	12	20	38	49	39	20	12
Грудень	31	744	9	9	15	28	36	29	15	9
Рік	365	8 760								

Таблиця 3

Сонячні теплонадходження через світлопрозорий елемент будівлі, $E_{sol,K}$ Вт

Table 3

Solar heat gain through the translucent element of the building, $E_{sol,K}$ W

Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ
1	2	3	4	5	6	7	8
17,36	0,00	75,3	0,00	104,23	0,00	88,75	0,00
28,15	0,00	124,56	0,00	150,55	0,00	130,55	0,00
38,30	0,00	185,63	0,00	190,35	0,00	211,39	0,00
55,70	0,00	283,65	0,00	206,33	0,00	274,31	0,00
68,77	0,00	377,85	0,00	213,66	0,00	353,21	0,00
83,55	0,00	415,36	0,00	205,36	0,00	390,27	0,00
75,35	0,00	405,90	0,00	211,55	0,00	388,51	0,00
54,69	0,00	377,56	0,00	230,33	0,00	334,23	0,00
35,67	0,00	283,67	0,00	255,66	0,00	265,61	0,00
23,05	0,00	160,35	0,00	198,95	0,00	155,21	0,00
13,67	0,00	70,55	0,00	102,13	0,00	71,21	0,00

Таблиця 4

Сонячні теплонадходження через світлопрозорий елемент будівлі, $E_{sol,K}$ Вт

Table 4

Solar heat gain through opaque building elements, $E_{sol,K}$ W

Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ
1	2	3	4	5	6	7	8
4,52	0,00	2,25	0,00	11,11	0,00	2,11	0,00
5,03	0,00	4,58	0,00	16,51	0,00	2,55	0,00
7,91	0,00	6,53	0,00	21,01	0,00	6,69	0,00
11,21	0,00	9,81	0,00	22,59	0,00	9,18	0,00
13,57	0,00	13,55	0,00	21,21	0,00	11,18	0,00
16,52	0,00	14,88	0,00	22,39	0,00	13,21	0,00
14,91	0,00	14,41	0,00	21,53	0,00	12,25	0,00
10,21	0,00	13,36	0,00	25,69	0,00	11,05	0,00
6,53	0,00	9,71	0,00	27,88	0,00	8,82	0,00
3,98	0,00	5,11	0,00	21,05	0,00	5,55	0,00
2,51	0,00	2,51	0,00	10,05	0,00	1,61	0,00
1,51	0,00	1,73	0,00	6,32	0,00	1,85	0,00

Таблиця 5

Теплове навантаження на систему опалення

Table 5

Thermal load on the heating system

Місяць року	Кількість днів	Кількість годин	Θt	$\Theta_{int, set, H}$	$Q_{H, tr, од}$, КВт·год	$Q_{H, ve, год}$, КВт·год	$Q_{H, ht, од}$, КВт·год	$Q_{H, so l, год}$, КВт·год	$Q_{H, in t, год}$, КВт·год	$Q_{H, gn, од}$, КВт·год	γ_H	η_H	$Q_{H, nd, од}$, КВт·год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Січень	31	744	-4,7	20	2336	951	3287	227	631	890	0,3	1,00	2285
Лютий	28	672	-3,8		2033	828	2860	318	598	931	0,3	1,00	1895
Березень	31	744	1,1		1787	728	2515	514	631	1098	0,5	1,00	1285
Квітень	30	720	9,6		952	387	1339	628	598	1185	1,0	0,98	70
Травень	31	744	16		378	154	532	807	631	1359	2,8	0,36	0
Червень	30	720	19,6		37	15	52	845	598	1485	29,2	0,03	0
Липень	31	744	21,6	-151	-62	-213	860	631	1531	-7,3	0,24	0	
Серпень	31	744	20,7	-66	-27	-93	796	598	1385	-15,9	0,11	0	
Вересень	30	720	15,4	421	171	592	650	631	1298	2,2	0,45	0	

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження табл. 5
Continuation of Table 5

Місяць року	Кількість днів	Кількість годин	Θt	$\Theta_{int, set, H}$	$Q_{H, tr, од}$, КВт·год	$Q_{H, ve, год}$, КВт	$Q_{H, ht, од}$, КВт·год	$Q_{H, sol, год}$, КВт	$Q_{H, int, год}$, КВт	$Q_{H, gn, од}$, КВт·год	γ_H	$\eta_{H, gn}$	$Q_{H, nd, од}$, КВт·год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Жовтень	31	744	8,6		1078	439	1517	430	598	1152	0,7	1,00	398
Листопад	30	720	2,2		1629	663	2292	199	631	835	0,4	1,00	1335
Грудень	31	744	-2,5		2128	866	2994	154	598	790	0,3	1,00	2058
Всього за рік	365	8760											9299

Таблиця 6

Теплове навантаження системи охолодження

Table 6

Thermal load of the cooling system

Місяць року	Кількість днів	Кількість годин	Θt	$\Theta_{int, set, C}$	$Q_{C, tr, год}$, КВт	$Q_{C, ve, год}$, КВт	$Q_{C, ht, год}$, КВт	$Q_{C, sol, год}$, КВт	$Q_{C, int, год}$, КВт	$Q_{C, gn, год}$, КВт	γ_C	$\eta_{C, gn}$	$Q_{C, nd, год}$, КВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Січень	31	744	-4,7		2256	1554	3765	227	631	900	0,2	0,23	0
Лютий	28	672	-3,8		1980	1390	3450	305	598	905	0,3	0,27	0
Березень	31	744	1,1		1890	13225	3215	445	631	1190	0,4	0,36	0
Квітень	30	720	9,6		1285	815	2156	598	598	1195	0,6	0,57	0
Травень	31	744	16		935	641	1590	800	631	1385	0,9	0,88	85
Червень	30	720	19,6		681	461	1132	801	598	1491	1,3	0,99	356
Липень	31	744	21,6	30	561	377	883	810	631	1498	1,6	1,00	580
Серпень	31	744	20,7		631	430	1001	750	598	1435	1,4	0,99	390
Вересень	30	720	15,4		954	598	1581	601	631	1290	0,8	0,79	30
Жовтень	31	744	8,6		1387	911	2405	425	598	1015	0,5	0,45	0
Листопад	30	720	2,2		1787	1256	3055	190	631	833	0,3	0,28	0
Грудень	31	744	-2,5		2125	1482	3636	150	598	830	0,2	0,22	0
Всього за рік	365	8760											1441



Рис. 3. Енергопотреби на систему опалення

Fig. 3. Energy consumption for the heating system

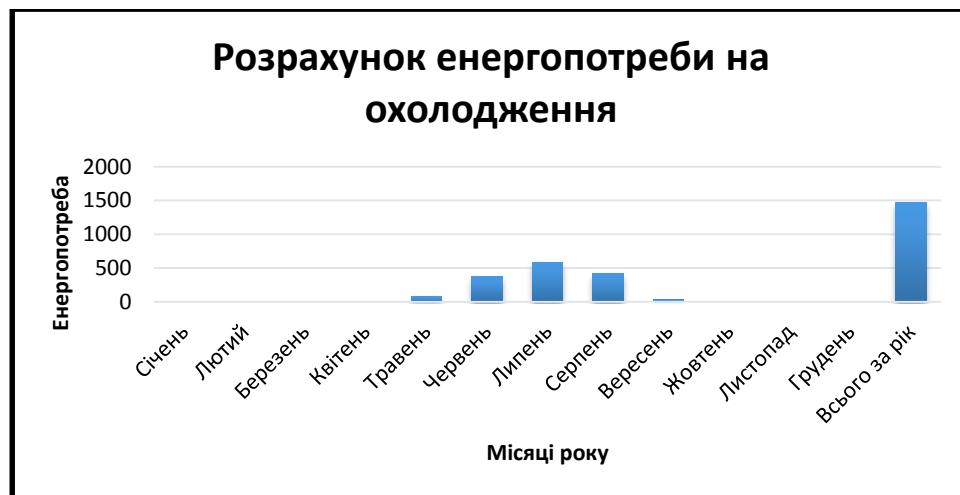


Рис. 4. Енергопотреби на систему охолодження

Fig. 4. Energy consumption for the cooling system

Таблиця 7

Теплотехнічні характеристики матеріалів

Table 7

Thermal characteristics of materials

Матеріали	$R, m^2 \cdot ^\circ C / Wm$	δ, m	$\varphi, kJ / m^2 \cdot ^\circ C$	$Q, kJ / kg$	$\Delta T / \Delta, ^\circ C / cm$
Цегла	1,84	0,46	464	840	4
Керамзитобетон	2,06	0,36	230	800	6
Газобетонні блоки	0,83	0,1	50	1 000	15
Мінеральна вата	2,00	0,07	3	920	40

Задача оптимального керування $Q_{(t)}$, розглянута як задача мінімізації часу переходу від температури T_1 до температури T^{end} , має очевидне розв'язання у двох конкретних випадках.

У разі мінімізації витрат теплової енергії на нагрівання огорожувальних конструкцій та внутрішнього повітря, а також при збільшенні швидкості зміни температури огорожень, завдання оптимального керування має очевидне розв'язання. Обидва ці сценарії можливі, коли застосовуються конструкції з низькими теплоаккумуляційними властивостями.

Вплив теплотехнічних характеристик будівельних матеріалів і конструкцій на швидкість нагрівання проілюстровано на прикладі матеріалів, зазначених в табл. 7.

У другому стовпчику наведені значення термічного опору матеріалів відповідної товщини, що вказана в стовпчику 3 [15].

Стовпчик 4 містить теплоаккумуляційні показники, а стовпчик 5 – кількість тепла, необхідного для підвищення температури з 0 до 20 °C для матеріалу вказаної товщини та площі 1 м².

У стовпчику 6 подано швидкість зміни температури поверхні матеріалу при впливі джерела потужністю 1 кВт.

Аналіз табл. 7 показує: чим нижчий теплоаккумуляційний показник матеріалу, тим швидше він нагрівається і тим менше енергії для цього потрібно.

Другий варіант розв'язання задачі оптимізації можливий за умов високого коефіцієнта конвективної теплопередачі між внутрішнім повітрям і внутрішньою поверхнею огорожувальної конструкції.

Враховуючи, що коефіцієнт конвективного теплообміну за умов вільної конвекції становить близько 4 Вт/м²·°C його збільшення до значення 15 Вт/м² може утворитися за рахунок нагріву огорожуючої конструкції надстилючим струменем.

Таким чином, можна сформулювати рекомендації щодо енергоефективного методу розігрівання приміщення, який спрямований на мінімізацію енергоспоживання.

Суть методу полягає в подачі тепла до опалювальних приладів і регулюванні тепловіддачі, причому подача тепла здійснюється протягом максимально короткого часу за умови повного використання потужності опалювального обладнання.

Розподіл тепла в процесі нагрівання приміщення відбувається за допомогою спрямованих теплових струменів.

Автоматизована система управління забезпечує своєчасний перехід до режиму подачі тепла, який підтримує нормативний рівень теплового обміну в приміщенні.

Наукова новизна та практична значимість

У даній науковій статті якісно та кількісно оцінено зміни в методиці визначення основних видів кліматичних навантажень на будівельні конструкції для умов України, зокрема вплив інсоляції, вітрового навантаження, температури зовнішнього повітря, інфільтрації та теплозахисту огорожувальних конструкцій.

З практичної точки зору, у ході проведеного аналізу отримано дані, які дозволяють визначити шляхи та напрями подальшого вдосконалення та уточнення наявних методик розрахунку основних кліматичних навантажень для умов України.

Висновки

На основі чисельного моделювання підтверджено, що досягнення високої енергоефективності в будівлі багатoproфільного медичного центру можливе за умови комплексного врахування кліматичних умов, орієнтації фасадів, теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій і використання сучасного інженерного обладнання.

У досліджуваному об'єкті наявні вікна з боку північного фасаду на обох поверхах, проте буферні зони були передбачені на кожній сходовій клітині. Незважаючи на це, за результатами моделювання будівля відповідала встановленим критеріям.

Ймовірно, цього вдалося досягти завдяки впровадженню сучасних енергоефективних інженерних систем, зокрема теплового насоса з коефіцієнтом ефективності (COP) 3,5, а також використання окремих припливних та витяжних систем вентиляції з високим рівнем рекуперації тепла, яка сягає майже 85 %.

Варто зазначити, що таке обладнання характеризується низьким споживанням електроенергії (до 0,2...0,3 кВт), що суттєво знижує загальне енергоспоживання будівлі. Якщо ж використовувати дешевше та менш ефективне обла-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

днання, досягти стандартів «пасивного» будинку може виявитися неможливо. Це й створює основну дилему енергоефективного будівництва – баланс між інвестиціями та ефективністю.

Альтернативним підходом є досягнення необхідних енергетичних показників виключно за рахунок архітектурних та конструктивних рішень. Однак і в цьому випадку постає фінансове питання, адже використання високоякісних вікон та ефективних будівельних матеріалів також потребує значних коштів, що не завжди доступно для замовника.

Ще одним викликом є обмеженість даних для точного розрахунку, зокрема щодо фактич-

них показників роботи вентиляційних систем та теплових насосів.

Лабораторні дослідження таких параметрів майже недоступні, особливо зважаючи на те, що в базі даних програмного забезпечення присутнє лише одне українське місто.

З огляду на це, для реального досягнення цілей у сфері енергоефективного будівництва необхідно розробити вітчизняні розрахункові комплекси, адаптовані до умов конкретних кліматичних зон України, що дозволить точніше прогнозувати та оптимізувати енергоспоживання будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В. С., Сергеев П. В. *Енергоефективність будівель* : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. 150 с.
2. Богданов В. С., Кравченко О. В. *Математичне моделювання теплових процесів у будівлях*. Київ : НУ-БіП України, 2018. 120 с.
3. Гарасимчук І. Д., Панцир Ю. І., Оленюк О. А., Печенюк А. В. Сучасні виклики та перспективи підвищення енергоефективності будівель і споруд в Україні. *Подільський вісник*. 2025. № 46. С. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-1.33>
4. Головка В. Ф. *Теплові насоси: теорія та практика застосування*. Львів : ПДТУ, 2019. 200 с.
5. Коменда Н. В., Грицюк І. В., Волинець В. І., Гадай А. В., Коменда Д. Т. Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2025. № 23. С. 123–131. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12)
6. Левчук О. В., Доронін В. А. *Енергоефективність будівель*. Київ : Ліра-К, 2017. 175 с.
7. Лецишин І. М., Максимець О. В. Енергоефективність будівель як один із напрямків стратегії сталого розвитку сучасних міст та регіонів. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects* : International Science-Practical Conference, Lviv, 23–25 жовт. 2024 р. DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.4.3>
8. Пастухова С. В., Анін В. І., Метеленко Н. Г. Енергозберігаючі технології при будівництві будівель та споруд на території України. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 24. С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291861>
9. Сердюк В. Р., Франишина С. Ю., Сердюк Т. В., Христич О. В. Організаційно-технологічні заходи термомодернізації застарілого житлового фонду. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 2. С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-6-17>
10. Фаренюк Г. Г., Возняк О. Т., Шаповал С. П. *Термомодернізація житлових будинків*. Київ : ДП НДІБК, 2018. 112 с.
11. Aruta G., Ascione F., Iovane T., Mastellone M. Thermal resilience to climate change of energy retrofit technologies for building envelope. *Energy*. 2025. Vol. 327. Article 136489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136489>
12. Brudermueller T., Potthoff U., Fleisch E., Wortmann F. Estimation of energy efficiency of heat pumps in residential buildings using real operation data. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. Article 2834. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58014-y>
13. Devkota K., Rasul M. G., Chowdhury A. A., Azad A. K. Recent advancements in low-energy buildings: integrating bio-phase change materials and rooftop greenery systems *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 101. Article 111790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.111790>
14. Ma Z., Awan M. B., Lu M., Ali M. An overview of emerging and sustainable technologies for increased energy efficiency and carbon emission mitigation in buildings. *Buildings*. 2023. Vol. 13, Iss. 10. 2658. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13102658>

15. Rabczak S., Mateichyk V., Smieszek M. Evaluating the energy efficiency of combining heat pumps and photovoltaic panels in eco-friendly housing. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 13. P. 5575. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135575>

A. V. RADKEYCH^{1*}, M. M. LIAKHOVETSKA-TOKARIEVA^{2*}, S. V. HAVRYLYUK^{3*}

^{1*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

^{2*}Dep. «Heating, Ventilation, Air Conditioning and Heat and Gas Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleg Petrova St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (097) 923 47 73, e-mail lyakhovetsky-tokareva@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-0338-4930

^{3*}Designer of HVAC and HVAC systems Climatech, Naberezhna Zavodska Str., 44, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (096) 718 89 17, e-mail s.v.gavr28@gmail.com, ORCID 0009-0001-6827-7722

Optimization of Energy Efficiency of a Multi-Profile Medical Center Building

Purpose. Increasing the thermal efficiency of a multidisciplinary medical center building by optimizing architectural and planning solutions, taking into account climatic conditions and improving the parameters of engineering systems. The building is considered as a single energy system, the efficiency of which is determined by the interaction of external and internal factors. **Methodology.** Is based on mathematical modeling of heat and mass transfer, analysis of climatic data, and calculation of energy consumption in accordance with current standards. The study takes into account the effects of solar insolation, wind loads, outdoor air temperature, air infiltration, and thermal insulation of building envelopes. An indicator of the efficiency of a design solution is proposed, which assesses its deviation from the energy-optimal variant. **Findings.** Are based on the example of a multidisciplinary medical center located in the city of Dnipro. An analysis of insolation according to the orientation of facades was carried out, thermal gains through transparent and opaque elements were calculated, and heating and cooling loads were determined. Seasonal climate variability, thermal inertia of materials, and the operational regime were taken into account. The study confirmed that the building's orientation, glazing area, ventilation system efficiency, and the quality of engineering equipment significantly affect energy consumption. A method for determining the optimal building dimensions is proposed, based on local climatic data and the potential of solar energy. **Originality.** lies in the substantiation of a systemic approach to energy-efficient design, which combines climatic factors, architectural constraints, and thermal characteristics into a unified model. A coefficient is proposed to evaluate the design solution in terms of its energy efficiency. **Practical value.** lies in the development of recommendations for reducing energy consumption. The proposed solutions make it possible to reduce thermal loads on engineering systems by 20–25%, lower operating costs, and improve comfort. The examined facility includes a ventilation system with heat recovery (up to 85%) and a heat pump with a COP of 3.5, which resulted in significant energy savings. The results confirm the effectiveness of integrating architectural design with modern engineering equipment and climate adaptation. The methodology can be applied to a wide range of public and residential buildings. **Conclusions.** Comprehensive energy-efficient design requires the integration of architecture, energy systems, and climatology. The proposed approach enables the development of projects that not only comply with standards but also ensure minimal energy consumption under real operating conditions.

Keywords: energy efficiency; thermal balance; climatic conditions; heat transfer; insolation; ventilation

REFERENCES

1. Biletskyi, V. S., & Serheiev, P. V. (2017). *Energy Efficiency of Buildings*. Kyiv: NTUU “KPI”. (in Ukrainian)
2. Bohdanov, V. S., & Kravchenko, O. V. (2018). *Mathematical Modeling of Heat Processes in Buildings*. Kyiv: NULES of Ukraine. (in Ukrainian)
3. Harasymchuk, I. D., Pantsyr, Yu. I., Olenyuk, O. A., & Pecheniuk, A. V. (2025). Modern Challenges and Prospects for Improving the Energy Efficiency of Buildings and Structures in Ukraine. *Podilskyi Bulletin*, (46), 228-235. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-1.33> (in Ukrainian)
4. Holovko, V. F. (2017). *Heat Pumps: Theory and Practice of Application*. Lviv: PDTU. (in Ukrainian)
5. Komenda, N. V., Hrytsiuk, I. V., Volynets, V. I., Hadai, A. V., & Komenda, D. T. (2025). Scientific Approaches to Assessing the Energy Efficiency of Buildings. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*. (23), 123-131. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12) (in Ukrainian)
6. Levchuk, O. V., & Doronin, V. A. (2017). *Energy Efficiency of Buildings*. Kyiv: LiraK. (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Leshchyshyn, I. M., & Maksymets, O. V. (2024, October). Energy Efficiency of Buildings as a Direction of Sustainable Development Strategy for Modern Cities and Regions. Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. *International Science-Practical Conference*. Lviv, Ukrainian. DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.4.3> (in Ukrainian)
8. Pastukhova, S. V., Anin, B. I., & Metelenko, N. G. (2023). Energy-saving technologies in the construction of build-ings and structures in Ukraine. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, (24), 56-65. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291861> (in Ukrainian)
9. Serdiuk, V. R., Franyshyna, S. Yu., Serdiuk, T. V., & Khrystych, O. V. (2022). Organizational and Technological Measures for Thermomodernization of the Obsolete Housing Stock. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. (2), 6-17. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-6-17> (in Ukrainian)
10. Farenjuk, H. H., Vozniak, O. T., & Shapoval, S. P. (2018). *Thermomodernization of Residential Buildings*. Kyiv: State Research Institute of Building Constructions. (in Ukrainian)
11. Aruta, G., Ascione, F., Iovane, T., & Mastellone, M. (2025). Thermal Resilience to Climate Change of Energy Retrofit Technologies for Building Envelope. *Energy*, 327, Article 136489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136489> (in English)
12. Brudermueller, T., Potthoff, U., Fleisch, E., & Wortmann, F. (2025). Estimation of Energy Efficiency of Heat Pumps in Residential Buildings Using Real Operation Data. *Nature Communications*, A16, Article 2834. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58014-y> (in English)
13. Devkota, K., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Azad, A. K. (2025). Recent Advancements in Low-Energy Buildings: Integrating Biophase Change Materials and Rooftop Greenery Systems. *Journal of Building Engineering*. Vol. 101. Article 111790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.111790> (in English)
14. Ma, Z., Awan, M. B., Lu, M., Ali, M. (2023). An Overview of Emerging and Sustainable Technologies for Increased Energy Efficiency and Carbon Emission Mitigation in Buildings. *Buildings*. 13(10), 2658. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13102658> (in English)
15. Rabczak, S., Mateichyk, V., & Smieszek, M. (2024). Evaluating the Energy Efficiency of Combining Heat Pumps and Photovoltaic Panels in Eco-Friendly Housing. *Applied Sciences*. 14(13), P. 5575. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135575> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.05.2025

Прийнята до друку: 23.09.2025

УДК 624.191.8.042:519.6

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, І. В. ДЕМЧЕНКО²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, 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. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 422 21 99, ел. пошта igord8411@gmail.com, ORCID 0009-0000-5385-9503

Чисельний аналіз напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення

Мета. Автори ставлять за мету провести чисельний аналіз напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення, і визначити зміну напружень та деформацій скінченноелементних моделей залежно від відстані між виробками. **Методика.** Проаналізовано аналітичний та чисельний підходи до розв'язання задачі напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення. У рамках аналітичного підходу розглянуто дві гіпотези виникнення взаємного впливу, що базуються на теоретичних засадах геомеханіки, однак не мають ґрунтового узагальнення. На відміну від аналітичних методів, більш плідним підходом до поставленої задачі можна вважати застосування чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів. За допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD розроблено три скінченноелементні моделі двох незакріплених виробок колового окреслення з відстанню між ними, що складає один, три та п'ять діаметрів. **Результати.** Виконано аналіз компонент переміщень та нормальних напружень по горизонтальній та вертикальній осях для різних відстаней між двома незакріпленими виробками, що складають від одного до п'яти діаметрів. Причому для порівняння напружень розглянутих випадків також розраховано поодинокую виробку, напружено-деформований стан якої вважаємо в цьому дослідженні еталонним. З'ясовано, що ізополі напружень по горизонтальній осі на відстані одного діаметра (D) між виробками вирости в 1,2...1,3 рази порівняно з поодинокую виробкою, що свідчить про явно виражений взаємний вплив. **Наукова новизна.** На основі аналізу отриманих результатів проведено оцінку зміни напружень та переміщень двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення для різних варіантів відстаней між ними. **Практична значимість.** Розроблено пропозиції щодо розташування двох незакріплених виробок колового окреслення з таким розрахунком, щоб вплив між ними був визначеним і контрольованим.

Ключові слова: виробка колового окреслення; взаємний вплив; напружено-деформований стан; чисельний аналіз; метод скінченних елементів

Вступ

Під час будівництва підземних об'єктів, зокрема протяжних споруд метрополітенів, виникає технологічна ситуація, під час якої споруджують дві виробки колового окреслення [2]. Оскільки ці виробки знаходяться на певній відстані, між ними може виникнути ситуація взаємного впливу, що характеризується збільшенням напружень і переміщень і, відповідно, зміною міцності та стійкості [3].

Найпоширенішою такою ситуацією є розташування перегінних тунелів, які підходять до станції метрополітену або відходять від неї. Другим випадком взаємовпливних виробок є такий, що виникає під час спорудження станцій колонного або пілонного типів [2]. Цей випадок характеризується тим, що на деякому

етапі спорудження трисклепінчастої колонної або пілонної станції два станційні тунелі, закріплені залізобетонною або чавунною оправою, є розділеними ґрунтовим масивом, але все ж таки формують загальний напружено-деформований стан. Більш складною, але й менш розповсюдженою є ситуація будівництва та експлуатації конструкції розгалуження двох перегінних тунелів, у якій вони поєднані в єдину підземну споруду.

У рамках цього дослідження розглянуто саме паралельні виробки, розташування яких на певній відстані породжує ситуацію взаємного впливу [7, 9], тобто випадок розгалуження не розглянуто [4]. Проте і у вказаному випадку виникає загальний для двох виробок напружено-деформований стан, що викликає потребу

в його визначенні. Це пояснюється тим, що поодинокі незакріплені або закріплені виробки конкретного діаметра має визначений характер розподілу напружень і деформацій на власному контурі, а також у довколишньому масиві. Визначення напружень і деформацій у випадку незакріпленої або закріпленої виробки є класичним і закріплене в низці розв'язаних задач (наприклад, рішення Г. Ламе або Г. М. Савіна [1]), які викладено в підручниках із геомеханіки й механіки підземних споруд.

Новою ситуацією, яка потенційно можлива сьогодні в реаліях російсько-української війни, є така, що виникає під час добудови додаткової виробки, паралельної вже наявній, в умовах використання підземного простору для створення споруд подвійного призначення. Ця ситуація доволі складна в аналітичному плані, оскільки в ній поєднані умови вже наявної закріпленої виробки та виробки, яку добудовують і яка є спочатку незакріпленою, а потім такою, що отримує визначений тип оправи [4, 12]. Таку ситуацію в статті не розглядаємо, оскільки вона потребує окремого детального наукового дослідження взаємного впливу виробок різного ступеня будівництва. Однак слід відзначити, що ця задача в закордонних наукових колах є відомою і такою, що має низку аналітичних та чисельних рішень. Ця задача досить актуальна для будівництва метрополітенів в Індії та Китаї, оскільки колові виробки перегінних тунелів, що проходять паралельно (у літературі вони навіть отримали нове термінологічне визначення – *twin tunnels*) щитовими комплексами, є дуже розповсюдженими [6, 8, 11].

Мета

Основною метою наукової статті є проведення чисельного аналізу напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення і визначення зміни напружень та деформацій скінченно-елементних моделей залежно від відстані між виробками.

Методика

Проблема аналітичного визначення напружено-деформованого стану двох незакріплених паралельних виробок колового окреслення виникла як розвиток гіпотези професора М. М. Протод'яконова про утворення склепіння обвалення. Цю гіпотезу широко застосовують у розрахунках підземних об'єктів, вона є окремим випадком пошуку вертикального гірського тиску над вказаними виробками. Припущенням, що нормує умову утворення загального склепіння обвалення для двох виробок, була гіпотеза академіка О. М. Динника, яка полягає в тому, що воно утворюється над двома виробками в тому випадку, якщо відстань між ними менша за значення, рівне п'яти їх радіусам (два з половиною діаметри).

Ці дві гіпотези, які, як було відзначено, увійшли до підручників, проте так і залишились гіпотезами, тобто, окрім теоретичних побудов, ніяких інших досліджень та перевірок не було проведено. Однак практика будівництва підземних об'єктів свідчить про те, що ці гіпотези потребують уточнення. Проблема в тому, що згідно з гіпотезами М. М. Протод'яконова й О. М. Динника відстань між незакріпленими виробками, за якої відбувається їхній взаємний вплив, не збігається з теоретичними даними. Це призводить до того, що міцність і стійкість паралельних виробок колового окреслення, що знаходяться на певній відстані одна від одної, оцінюють неточно. Відповідно, уточнення аналітичних рішень для двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення отримане за допомогою математичного моделювання, є актуальною науковою задачею.

Відомо, що розрахункова схема двох взаємовпливних виробок і розподіл напружень за різної відстані між ними значно змінюються (рис. 1) [1, 2]. Для відстані $b \geq 1,5l$ (де l – ширина виробки; для виробки колового окреслення відповідно $l=2r=D$) взаємний вплив суміжних виробок під час визначення напружень не перевищує 10 %. При цьому концентрація на стінці виробки відповідає концентрації напружень на стінці поодинокі виробки, а на середині відстані між виробками напруження близькі до побутових напружень масиву.

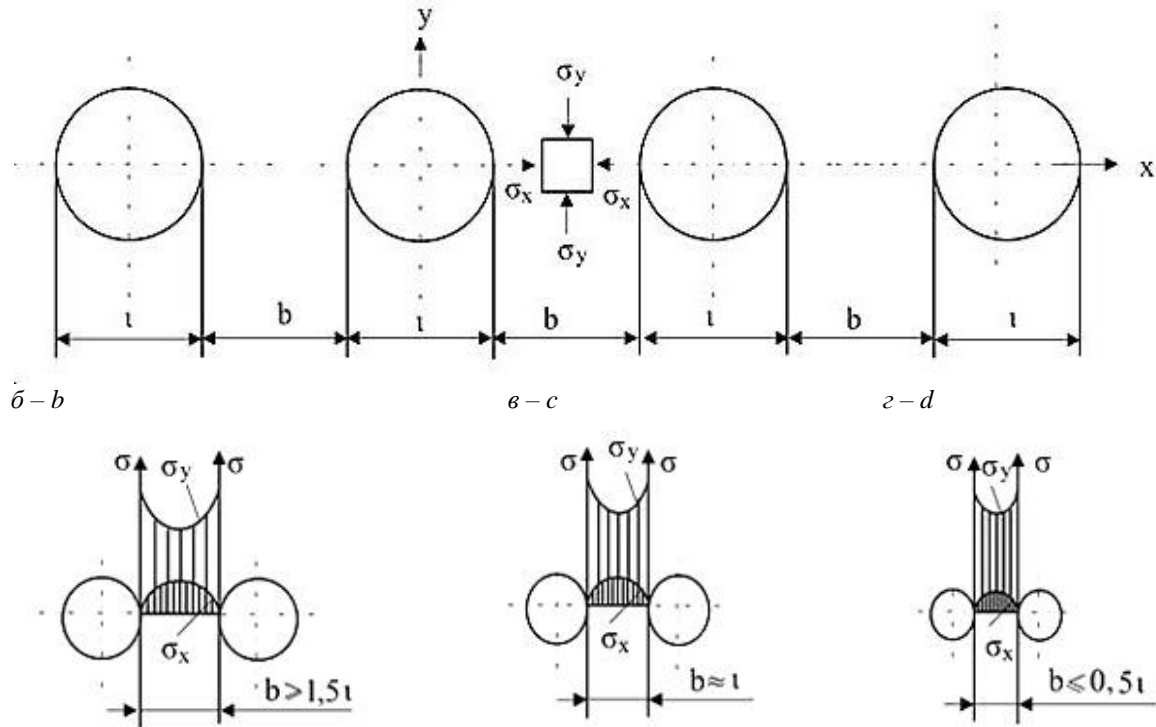
$a - a$ 

Рис. 1. Розрахункова схема двох взаємовпливних виробок (а),
і розподіл напружень за різних відстаней (б)
 $b \geq 1,5l$; в) $b \approx l$; г) $b \leq 1,5l$ між ними

Fig. 1. Calculation scheme of two mutually influencing workings (а),
and stress distribution at different distances (б)
 $b \geq 1.5l$; с) $b \approx l$; d) $b \leq 1.5l$ between them

Взаємний вплив виробок теоретично почне позначатися, коли відстань між їх контурами буде менша за три радіуси. Але існує теза, що проведення виробки викликає перерозподіл напружень у масиві в деякій обмеженій зоні і її впливом можна знехтувати вже на відстані $r = 3R$, причому похибка напружень буде складати близько 10 %, на відстані $r = 5R$ – 4 %, а $r = 10R$ – 1 % [1].

На відміну від аналітичних методів, більш плідним підходом до цієї задачі можна вважати застосування чисельних методів, зокрема метод скінченних елементів, оскільки результатами, одержаними з його допомогою, є ізолінії та ізополя параметрів напружено-деформованого

стану [5, 8, 10]. Їх легко інтерпретувати, і хоча вони є результатами конкретних випадків, побудовані залежності їх розподілу можуть надати важливу інформацію для вирішення цієї проблеми. Із вичерпною повнотою розрахунок оправ паралельних тунелів і напружено-деформований стан довколишнього масиву можна виконати за методом скінченних елементів. За допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD розроблено три скінченноелементні моделі двох незакріплених виробок колового окреслення з відстанню між ними, що складає один, три та п'ять діаметрів (рис. 2).

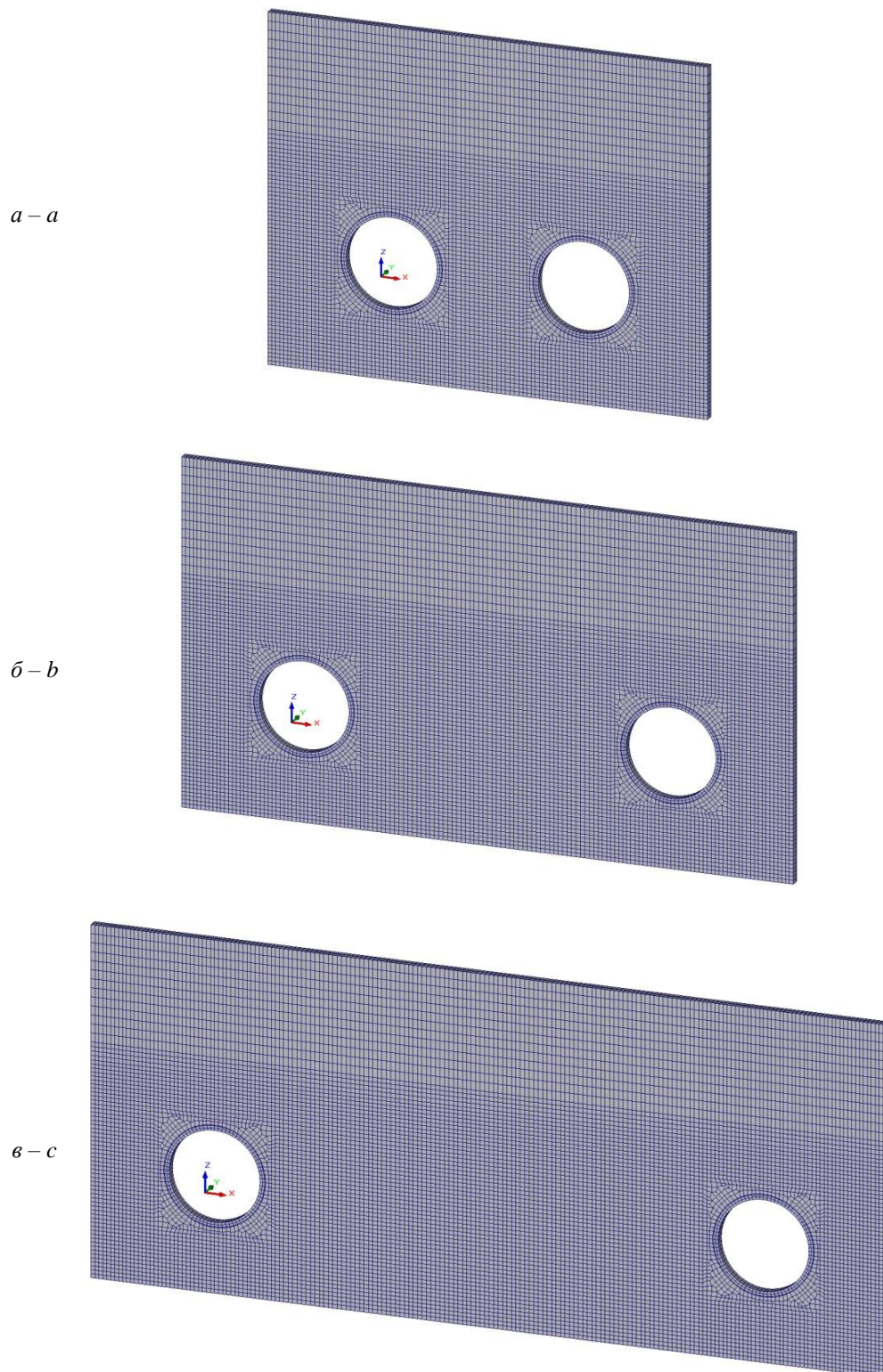


Рис. 2. Скінченноелементні моделі з відстанню між виробками, що складає D (*a*), $3D$ (*б*) і $5D$ (*в*)

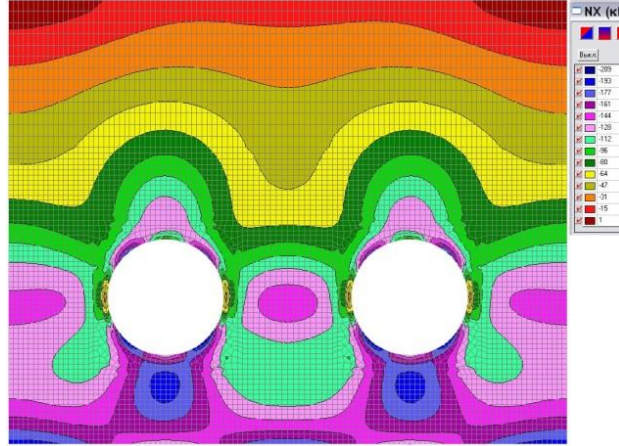
Fig. 2. Finite element models with the distance between workings constituting D (*a*), $3D$ (*b*) and $5D$ (*c*)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

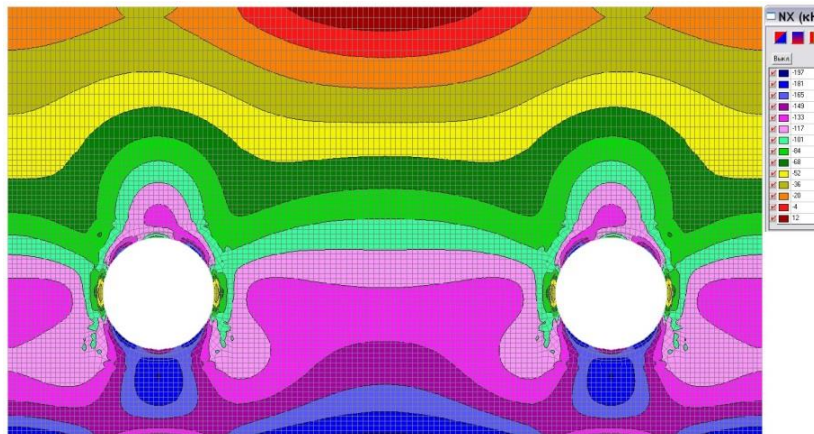
Після розробки скінченноелементних моделей проведено їх розрахунок, а результати детально проаналізовано. Для економії місця

в статті нижче наведено лише характерні напруження горизонтальної компоненти (рис. 3).

a – a



b – b



b – c

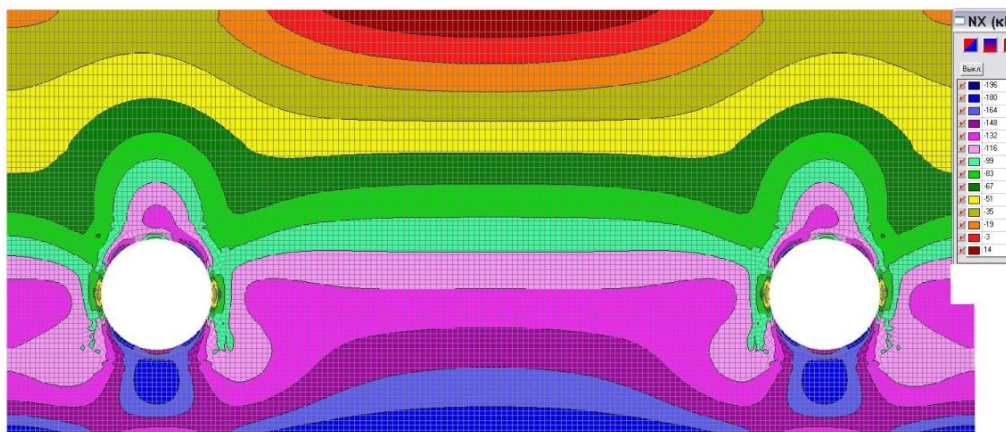


Рис. 3. Напружений стан моделей (горизонтальна компонента) з відстанню між виробками, що складає D (*a*), $3D$ (*b*) і $5D$ (*c*)

Fig. 3. Stress state of models (horizontal component) with the distance between the workings constituting D (*a*), $3D$ (*b*) and $5D$ (*c*)

Результати

Виконано аналіз компонент переміщень та нормальних напружень по горизонтальній та вертикальній осях за різних відстаней між двома незакріпленими виробками, що складають від одного до п'яти діаметрів. Причому для порівняння напружень розглянутих випадків також розраховано поодинокую виробку, напружено-деформований стан якої вважаємо в цьому дослідженні еталонним.

Переміщення й напруження розглянуто в п'яти точках моделі справа від вертикальної осі симетрії, оскільки зліва значення цих параметрів практично не змінюються, що свідчить про те, що взаємовплив тунелів лише локальний (рис. 4).

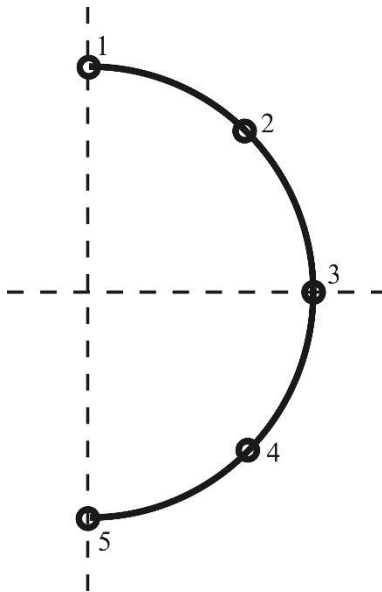


Рис. 4. Точки, у яких проведено порівняння напружень та переміщень:
1 – замок; 2 – 45° від вертикалі;
3 – 90° від вертикалі (на горизонтальному діаметрі);
4 – 135° від вертикалі; 5 – лоток

Fig. 4. Points at which the comparison of stresses and deformations was carried out:
1 – lock; 2 – 45° from the vertical;
3 – 90° from the vertical (on the horizontal diameter);
4 – 135° from the vertical; 5 – tray

Розглянуто ізополі на відстані одного діаметра (D) між виробками, причому спостерігається взаємний вплив виробок, який наочно відображає те, що ізополі мають спільну ізолінію. Ізополі мають витягнуту форму, горизон-

тальні переміщення незначні, але порівняно з поодинокую виробкою вони збільшились, що можна пояснити явним взаємним впливом виробок між собою (рис. 3, *a*).

Аналізуючи ізополі вертикальних переміщень по осі, також можна виявити значний вплив виробок одна на одну. Переміщення лінійно зменшуються з точки 1 (замок) до точки 5 (лоток). Ізополі мають вигляд смуг, які замикаються на виробках.

Проаналізувавши ізополі напружень по горизонтальній осі, можна зробити висновок, що на відстані одного діаметра (D) між виробками вони виростили в 1,2...1,3 раза порівняно з поодинокую виробкою. За характером ізополів напружень по вертикальній осі спостерігаємо, що виробки мають спільні ізополі напружень, які сходяться у верхніх частинах виробок. Найбільші напруження виникають у точці 3 (90°), що закономірно, оскільки точка на горизонтальному діаметрі є характерною для задачі пошуку взаємного впливу.

Аналіз ізополів на відстані трьох діаметрів ($3D$) між виробками свідчить, що їхній характер значно змінився, зони ізополів між виробками стали більшими і розтягнутими, у точці 1 (замок) та 5 (лоток) спостерігаються певні переміщення, а в точці 5 (лоток) переміщення вже не нульові і дорівнюють 1 мм. Але якщо порівняти з переміщеннями на відстані між виробками один діаметр (D), то можна побачити, що переміщення стали меншими.

Вигляд ізополів по вертикальній осі змінився, ізополі між виробками стали більш схожими на прямі смуги (рис. 3, *b*). Переміщення дещо зменшились, у точці 1 (замок) переміщення в 1,2 раза менші від переміщень на відстані між виробками один діаметр (D).

Вигляд ізополів напружень змінився, між виробками ізополі більш розтягнуті, у точках 2 (45°) та 4 (135°) напруження стали меншими майже в 1,2...1,3 раза. Напруження в цих точках є меншими за напруження в цих самих точках для варіанта поодинокі виробки, що можна пояснити тим, що напруження взаємно компенсуються.

Вигляд ізополів над виробками змінився, якщо порівняти з варіантом, у якому відстань між виробками становить один діаметр (D). Ізополі по вертикальній осі стали більш розтя-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

гнуті, напруження трохи зменшились. Ізополе блакитного кольору дуже змінило свій вигляд порівняно з ізополем на відстані одного діаметра (D) між виробками.

Розгляд ізополів на відстані п'яти діаметрів ($5D$) між виробками свідчить, що переміщення по горизонтальній осі схожі з переміщеннями в поодинокій виробці, крім точки 4 (135°), у якій переміщення на 1 мм більші. Переміщення по вертикальній осі стали меншими, а ізополя ще більше набувають вигляду схожого на недоторканий.

Аналіз ізополів напружень по горизонтальній осі (рис. 3, в) свідчить про те, що вони мають такий самий характер, як і напруження для відстані між виробками три діаметри ($3D$), а також у точках 2 (45°) та 4 (135°) відбувається взаємна компенсація напружень.

Напруження по вертикальній осі майже не відрізняються від напружень, коли відстань між виробками становить три діаметри ($3D$), а ізополя напружень дуже схожі на напруження попереднього варіанта.

Наукова новизна та практична значимість

Отримано результати аналізу й оцінки зміни напружень та переміщень двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення для різних варіантів відстані між ними. Розроблено пропозиції щодо розташування двох незакріплених виробок колового окреслення з таким розрахунком, щоб вплив між ними був визначеним і контрольованим.

Висновки

У статті наведено результати чисельного аналізу напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок коло-

вого окреслення і визначення зміни напружень і деформацій скінченноелементних моделей залежно від відстані між виробками.

Результати отримано шляхом розрахунку трьох скінченноелементних моделей двох незакріплених виробок колового окреслення з відстанню між ними, що складає один, три і п'ять діаметрів. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що саме чисельний аналіз може надати змогу в подальшому отримати закономірності зміни деформацій і напружень виробок колового окреслення (незакріплених і закріплених) від відстані між ними.

Порівняння деформацій і напружень розрахункових випадків із поодиноким виробкою якісно й кількісно демонструє значний взаємний вплив між варіантами відстаней в один і три діаметри. Скінченноелементна модель із відстанню в п'ять діаметрів також виявляє взаємний вплив, однак його значення досить близьке до аналітичного в 10 %.

Проведена наукова робота потребує подальшої розробки, що запланована в двох напрямках. У рамках першого напряму на вже розроблених моделях буде проведено параметричний аналіз напружено-деформованого стану з варіацією деформативних характеристик масиву. Це дозволить з'ясувати вплив модуля пружності у сукупності зі зміною відстані між виробками на формування загального напружено-деформованого стану.

У рамках другого напряму, на основі отриманих результатів незакріпленого варіанта, заплановано дослідити дві закріплені виробки колового окреслення з різним типом оправи, тобто дослідити вплив модуля пружності конструкції на розподіл сукупного напружено-деформованого стану системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савин Г. Н. *Концентрация напряжений около отверстий*. Киев : Наукова думка. 1968. 891 с.
2. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро : Журфонд. 2020. 187 с.
3. Attewell P. B., Yeates J., Selby A. R. *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. London : Chapman & Hall. 1986. 336 p.
4. Byun G. W., Kim D. G., Lee S. D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Vol. 21. Iss. 3–4. P. 361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.178>

5. Do N. A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I. 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 37. P. 115–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.008>
6. Fang Q., Zhang D., Li Q., Wong L. N. Y. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 45. P. 128–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.001>
7. Ghaboussi J., Ranken R. E. Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1977. Vol. 1. Iss. 1. P. 75–103.
8. Hage Chehade F., Shahrouh I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. *Tunnelling and underground space technology*. 2008. Vol. 23. Iss. 2. P. 210–214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.03.004>
9. Kim S.-H. Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2004. Vol. 19. Iss. 4–5. P. 448–459.
10. Nawel B., Salah M. Numerical modeling of two parallel tunnels interaction using three-dimensional finite elements method. *Geomechanics & engineering*. 2015. Vol. 9. Iss. 6. P. 775–791. DOI: <http://doi.org/10.12989/gae.2015.9.6.775>
11. Singh C. S., Shrivastva B. K. Stability analysis of twin tunnels by finite element method. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2000. Vol. 2. P. 57–60.
12. Zhang D. M., Huang Z. K., Li Z. L., Zong X., Zhang D. M. Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath. *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 108. P. 197–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.026>

O. L. TIUTKIN^{1*}, I. V. DEMCHENKO²

^{1*}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

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 422 21 99, e-mail igord8411@gmail.com, ORCID 0009-0000-5385-9503

Numerical Analysis of the Stress-Strain State of Two Unanchored Interacting Circular-Shaped Workings

Purpose. The authors aim to perform a numerical analysis of the stress-strain state of two unsupported circularly influenced workings and determine the change in stresses and strains of finite element models depending on the distance between the workings. **Methodology.** We analyze analytical and numerical approaches to solving the problem of the stress-strain state of two unsupported circularly influenced workings. Within the framework of the analytical approach, two hypotheses of the occurrence of mutual influence based on the theoretical principles of geomechanics, but without a thorough generalization, are considered. In contrast to analytical methods, a more fruitful approach to the problem can be considered the use of numerical methods, in particular the finite element method. Using the professional calculation complex Structure CAD, three finite element models of two unsupported circular workings with a distance between them of one, three, and five diameters were developed. **Findings.** The analysis of the displacement components and normal stresses along the horizontal and vertical axes for different distances between two unsupported workings ranging from one to five diameters was performed. Moreover, in order to compare the stresses of the considered cases, a single working was also calculated, the stress-strain state of which is considered in this study to be the reference state. It was found that the stress isofields along the horizontal axis at a distance of one diameter (D) between the workings increased by 1.2...1.3 times compared to a single workings, which indicates a clearly expressed mutual influence. **Originality.** Based on the analysis of the obtained results, the change in stresses and displacements of two unsupported circularly influenced workings for different options of distances between them was estimated. **Practical value.** Proposals have been developed for the location of two unsupported circular workings in such a way that the influence between them is determined and controlled.

Keywords: circular outline excavation; interaction between excavations; stress-strain state; numerical analysis; finite element method

REFERENCES

1. Savin, G. N. *Kontsentratsiya napryazheniy okolo otverstiy*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
2. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstrukttsii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
3. Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. London: Chapman & Hall. (in English)
4. Byun, G. W., Kim, D. G., & Lee, S. D. (2006). Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3–4), 361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.178> (in English)
5. Do, N.-A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 115-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.008> (in English)
6. Fang, Q., Zhang, D., Li, Q., & Wong, L. N. Y. (2015). Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 128-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.001> (in English)
7. Ghaboussi, J., & Ranken, R. E. (1977). Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1(1), 75-103. (in English)
8. Hage Chehade, F., & Shahrou, I. (2008). Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 210-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.03.004> (in English)
9. Kim, S.-H. (2004). Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(4-5), 448. (in English)
10. Nawel, B., & Salah, M. (2015). Numerical modeling of two parallel tunnels interaction using three-dimensional finite elements method. *Geomechanics & engineering*, 9(6), 775-791. DOI: <http://doi.org/10.12989/gae.2015.9.6.775> (in English)
11. Singh, C. S., & Shrivastva, B. K. (2000). Stability analysis of twin tunnels by finite element method. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2, 57-60. (in English)
12. Zhang, D. M., Huang, Z. K., Li, Z. L., Zong, X., & Zhang, D. M. (2019). Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath. *Computers and Geotechnics*, 108, 197-211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.026> (in English)

Надійшла до редколегії: 06.05.2025

Прийнята до друку: 09.09.2025

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4:621.355

Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ^{1*}, С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ², О. Е. ХАУСТОВ³, М. І. СТЕЦЕНКО⁴

^{1*}Каф. електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (067) 993 75 69, ел. пошта Borys.Liubarskyi@khpri.edu.ua, ORCID 0000-0002-2985-7345

²Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Шевченка, 47, Харків, Україна, 61013, тел. +38 (057) 707 61 33, ел. пошта nii90@email.ua, ORCID 0000-0001-9422-6390

³Каф. електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 63 67, ел. пошта hausz91@gmail.com, ORCID 0009-0001-0363-6173

⁴Каф. електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 63 67, ел. пошта Maksym.Stetsenko@iee.khpri.edu.ua, ORCID 0009-0008-1594-2902

Визначення складових елементів трикомпонентного гібридного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу

Мета. Дослідження спрямовано на визначення кількісних складових елементів гібридного трикомпонентного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу. **Методика.** Визначено, що за критеріями маси, об'єму, вартості та вартості однієї кіловат-години жоден із варіантів моноелементного накопичувача одночасно не забезпечує мінімальних показників по всіх критеріях. Таким чином, раціонально застосувати комбінований трикомпонентний накопичувач енергії. Розглянуто алгоритм постановки задачі умовної мінімізації вартості елементів трикомпонентного комбінованого накопичувача, що включає в себе наступне: 1) встановлення цільової функції у вигляді загальної вартості елементів; 2) визначення параметрів – кількість гілок кожного з типів накопичувачів; 3) встановлення обмежень щодо заданої енергоємності, потужності, масогабаритних показників та обмежень щодо параметрів; 4) визначення методу вирішення задачі, яким обрано метод Вейля. **Результати.** Авторами доведено: 1) Аналіз отриманих загальних результатів доводить наступне. Зі збільшенням заданої потужності зростає кількість гілок суперконденсаторів та зменшується кількість гілок ЛТО-елементів. Це обумовлено тим фактом що суперконденсаторні комірки мають найкращі показники потужності заряду/розряду, а ЛТО-елементи кращі енергоємні показники. Щодо LFP-елементів, то кількість гілок лежить в межах від 5 до 24, що забезпечує додаткову ємність елементів накопичувача, особливо при середніх значеннях потужності; 2) Загальна складова ємності ЛТО-елементів збільшується зі зниженням потужності накопичувача та складає 11,5 % загальної ємності до 66,4 % при зменшенні потужності з 4 740 кВт до 920 кВт. Складова ємності суперконденсаторів навпаки зменшується зі зниженням потужності накопичувача та складає 70,6 % загальної ємності до 2,4 % при зменшенні потужності з 4 949 кВт до 920 кВт, що обумовлено доцільністю використання суперконденсаторів при великих потужностях. **Наукова новизна.** Авторами цієї роботи вперше було розроблено методику визначення оптимальних параметрів комбінованого трикомпонентного накопичувача енергії на підставі вирішення задачі умовної мінімізації з урахуванням масо-габаритних обмежень. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можливо визначити параметри комбінованих накопичувачів для рухомого складу на прикладі plug-in гібридних енергетичних установках рейкового рухомого складу кар'єрного локомотиву.

Ключові слова: plug-in енергетична установка; комбінований накопичувач енергії; залізничний транспорт; умовна оптимізація; кількість гілок накопичувача

Вступ

Рейковий транспорт забезпечує масові пасажирські й вантажні перевезення та є невід'ємною складовою багатьох виробничих процесів, а тому має відповідати вимогам щодо високої енергоефективності, низького впливу на навколишнє середовище та вартості перевезень. Досягнути цього можливо при застосуванні сучасних технологій, до яких належать plug-in тягові системи. Раціональне створення й використання таких систем забезпечить високі тягово-енергетичні показники рухомого складу при одночасному зменшенні споживання паливно-енергетичних ресурсів. Ключовим напрямом у дослідженні таких систем є визначення стратегій керування енергетичними потоками у plug-in енергетичній установці при використанні комбінованих накопичувачів енергії в поєднанні з багатодвигунним електроприводом. Концептуальним напрямом розвитку цієї технології є використання у складі накопичувача елементів різного типу. Одні характеризуються високими показниками потужності, інші – високою питомою енергією. В роботі [5] проведено дослідження гібридних систем з різнотипними літєвими елементами. За результатами досліджень було досягнуто збільшення щільності енергії на 5,56 % та питомої енергії на 28,21 % у порівнянні з накопичувачами на основі літєвих елементів одного типу. Дослідження гібридної установки, що було проведено у роботі [1], показало, що її побудова на NMC-елементах з високою питомою енергією та LTO-елементах з високою питомою потужністю, надає можливість отримати або зменшення маси до 33,5 %, або зменшення до 30 % вартості у порівнянні з моноелементними накопичувачами енергії. У роботі [6], присвяченій розробці методів оптимізації гібридних накопичувачів з літєвими елементами різних типів показано, що застосування гібридного накопичувача надає можливість знизити витрати порівняно із моноелементними накопичувачами. Таким чином, роботи направлені на визначення параметрів гібридних накопичувачів енергії є актуальними та надають можливість підвищення ефективності технології накопичення енергії на рухомому складі транспорту.

Мета

Враховуючи вищезгадане, автори мають за мету визначення кількісних складових елементів гібридного трикомпонентного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу.

Методика

На підставі розрахунків, що їх наведено у роботах [1, 8], визначено показники моноелементних накопичувачів при застосуванні тільки LTO-елементів, LFP-елементів та суперконденсаторів. В якості прикладу розглянуто LTO-елементи YINLONG 66160H 2.3v 40ah [12], LFP-елементи ENERpower 26650 LiFePO4 3.2V 3000mAh (10C) [7] та суперконденсатори Maxwell 3000 FARAD Capacitor Boostcap 3000f 2.7volt BCAP3000 [11] з урахуванням технічних вартісних параметрів елементів на основі інформації з [1, 8].

Ємність бортового накопичувача визначається за формулою [1, 8]

$$W_n = \frac{100 \Delta E}{(SOC_1 - SOC_2) k_1 k_2}, \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує зниження ємності БНЕ за період експлуатації, прийнято 0,9; k_2 – коефіцієнт, який враховує зниження ємності БНЕ при зміні температури, саморозряді й т.і., прийнято 0,95; SOC_1 – рівень заряду накопичувача; SOC_2 – рівень розряду накопичувача.

Величина SOC_1 обирається за рекомендацією [10] таким чином, щоб забезпечити зарядження накопичувача за максимальним рівнем потужності. Зазвичай, для літєвих елементів $SOC_1 = 90\%$, для суперконденсатора – 100% . Величину SOC_2 обрано за допустимим рівнем розрядження накопичувача. Зазвичай, $SOC_2 = 10\%$ для літєвих елементів, 0% для суперконденсаторів.

Для подальших досліджень використано елементи, що характеризуються наступними технічними параметрами.

Кількість послідовно з'єднаних елементів визначається як

$$N_s = \frac{U_{dc}}{U_{ch}}, \quad (2)$$

де U_{dc} – напруга проміжного контуру; U_{ch} – напруга закінчення заряджання елемента. Отримане значення N_s округлюється вгору.

Кількість паралельних гілок визначається з виразу

$$x_i = \max(N_1, N_2), \quad (3)$$

де N_1 – кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня накопичення енергії; N_2 – кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня потужності накопичувача.

Кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня накопичення енергії (W_n), визначається за виразом

$$N_1 = \frac{W_n}{N_s E_{cell} k_{ch}}, \quad (4)$$

де E_{cell} – ємність одного елемента, виражена у кВт·год; k_{ch} – коефіцієнт, що враховує зменшення енергії, яку може запасти елемент накопичувача енергії при заряджанні струмом, більшим за оптимальне його значення. За рекомендаціями [10] прийнято рівним 0,9. Отримане значення N_1 округлюється вгору.

Кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня потужності накопичувача, визначається за виразом

$$N_2 = \frac{P_n}{N_s U_{dis} I_{cell}}, \quad (5)$$

де P_n – номінальна потужність накопичувача; U_{dis} – напруга розряджання елемента; I_{cell} – менший із струмів заряду та розряду елемента $I_{cell} = \min(I_{ch}, I_{dis})$. Тут I_{ch} – допустимий струм заряджання, I_{dis} – допустимий струм розряджання.

Отримане значення N_2 округлюється вгору.

Кількість елементів:

$$N_{cell} = x_i N_s. \quad (6)$$

Загальна маса елементів:

$$m = N_{cell} m_{cell}, \quad (7)$$

де m_{cell} – маса одного елемента.

Об'єм, який необхідний для розміщення елементів бортової накопичувача визначено з виразу

$$V = N_{cell} a_{cell} b_{cell} h_{cell}, \quad (8)$$

де a_{cell} , b_{cell} , h_{cell} – геометричні розміри елемента, відповідно: довжина, ширина та висота.

Вартість елементів накопичувача

$$C = N_{cell} c_{cell}. \quad (9)$$

Загальна ємність елементів накопичувача дорівнює

$$E = N_{cell} E_{cell}. \quad (10)$$

Загальні результати розрахунків базових моноелементних накопичувачів наведено у табл. 1. за результатами розрахунків у [1, 8, 9].

Припущеннями при розрахунку є відсутність врахування об'ємів та мас елементів системи охолодження та розмірів BMS.

На підставі порівняльного аналізу табл. 1, найбільші масо-габаритні показники мають накопичувачі на основі LFP-елементів. Найменша маса у суперконденсаторного накопичувача. Найменший об'єм, необхідний для розміщення елементів, має LTO-елементний накопичувач. Найнижча вартість елементів спостерігається у випадку LTO-елементного накопичувального пристрою.

Загальна енергоємність комірок суперконденсаторного моноелементного накопичувача практично дорівнює його енергоємності. Однак при застосуванні LTO-елементів енергоємність перевищує необхідну у 5,5 разів, а у випадку LFP-елементів – у 14,7. Позитивним фактором є можливість дозаряджання накопичувача через декілька рейсів, однак значне недовикористання енергоємності призводить до збільшення маси і розмірів, а також капітальних витрат. Найменша вартість у моноелементного накопичувача на основі LTO-елементів, а найменша вартість однієї кВт·год – у LFP-елементного накопичувача [8].

За критеріями маси, об'єму, загальної вартості та вартості однієї кіловат-години жоден

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

з варіантів моноелементних накопичувачів не забезпечує мінімальних показників по всім критеріям одночасно. Таким чином раціональ-

но застосувати комбінований накопичувач енергії з елементами, що їх розглянуто вище для моноелементних накопичувачів.

Таблиця 1

Параметри базових моноелементних накопичувачів енергії

Table 1

Parameters of basic mono-element energy storage devices

Тип елемента	YINLONG 66160H 2.3v 40ah lto battery (LTO-елементи)	ENERpower 26650 LiFePO4 3.2V 3000mAh (10C) (LFP-елементи)	Maxwell 3000 FARAD Capacitor Boostcap 3000f 2.7volt BCAP3000 (суперконденсатори)
Робоча енергоємність накопичувача, кВт·год	146,8	146,8	146,8
Номинальна енергоємність, кВт·год	214,6	214,6	171,0
Номинальна потужність, кВт	4 949,0	4 949,0	4 949,0
Кількість послідовно з'єднаних елементів	293	236	314
Кількість паралельних гілок	47	1 399	93
Кількість елементів, шт	13 771	33 0164	29 202
Маса елементів, т	16,8	28,7	14,9
Об'єм елементів, м ³	9,6	14,5	14,5
Енергоємність елементів, кВт·год	1172	3170	173,6
Вартість елементів, тис. євро	1 101,7	1 254,6	1 314,1
Вартість однієї кіловат-години накопичувача, тис. євро / кВт·год	0,94	0,40	7,6

Задача оптимізації параметрів комбінованого накопичувача енергії належить до класу задач умовної мінімізації параметрів. На підставі попередніх [10] досліджень при невизначеності витрат на експлуатацію та утилізацію, для вирішення задачі в якості критерію обрано загальну вартість елементів накопичувача, яку треба мінімізувати. Цільова функція має наступний вигляд

$$C = C_{LTO} + C_{LFP} + C_{SC} \rightarrow \text{MIN}, \quad (11)$$

де C_{LTO} , – вартість LTO-елементів; C_{LFP} , – вартість LFP-елементів та C_{SC} – вартість суперконденсаторів. В табл.1 наведено технічні параметри елементів.

У зв'язку з тим, що накопичувач енергії складається з паралельних гілок включених елементів, параметрами для комбінованого накопичувача раціонально обрати кількість гілок

кожного з типів накопичувачів: x_1 – кількість гілок з LTO-елементами, x_2 – кількість гілок з LFP – елементами, x_3 – кількість гілок з суперконденсаторами.

Таким чином загальну вартість елементів можливо визначити за виразом

$$C = x_1 C_1 + x_2 C_2 + x_3 C_3 \rightarrow \text{MIN}, \quad (12)$$

де C_1 – вартість гілки LTO-елементів; C_2 – вартість гілки LFP-елементів; C_3 – вартість гілки суперконденсаторів.

Розглянемо обмеження, що накладені на параметри накопичувача та які будуть використані у задачі умовної мінімізації.

Обмеження подано у вигляді рівностей. До цієї групи відносяться обмеження, що встанов-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

люють потрібну номінальну потужність (P_n) та номінальну енергоємність накопичувача (W_n)

$$P = P_{LTO} + P_{LFP} + P_{SC} = P_n, \quad (13)$$

де P_{LTO} – номінальна потужність LTO-елементів, P_{LFP} – номінальна потужність LFP-елементів та P_{SC} – номінальна потужність суперконденсаторів.

$$W = W_{LTO} + W_{LFP} + W_{SC} = W_n, \quad (14)$$

де W_{LTO} – робоча енергоємність LTO-елементів; W_{LFP} – робоча енергоємність LFP-елементів; W_{SC} – робоча енергоємність суперконденсаторів.

Згідно підходів [2, 3, 10] задля встановлення у задачі мінімізації обмеження у вигляді рівностей, перетворимо їх до нерівності у вигляді

$$|P - P_n| \leq dP = 0,05P_n, \quad (15)$$

де dP – задана точність визначення потужності, яку для розглянутих розрахунків обрано у 5 % від P_n .

$$|W - W_n| \leq dW = 0,05W_n, \quad (16)$$

де dW – задана точність визначення енергоємності, яку для розглянутих розрахунків обрано у 5 % від W_n .

Враховуючи параметри накопичувача перетворимо залежності (13)-(16) до вигляду, необхідного для вирішення задачі

$$\begin{aligned} |x_1P_1 + x_2P_2 + x_3P_3 - P_n| \leq dP = \\ = 0,05P_n, \end{aligned} \quad (17)$$

де P_1 – потужність гілок з LTO-елементами; P_2 – потужність гілок з LFP – елементами; P_3 – потужність гілок із суперконденсаторами.

$$\begin{aligned} |x_1W_1 + x_2W_2 + x_3W_3 - W_n| \leq dW = \\ = 0,05W_n, \end{aligned} \quad (18)$$

де W_1 – енергоємність гілок з LTO – елементами; W_2 – енергоємність гілок з LFP – елементами; W_3 – енергоємність гілок із суперконденсаторами.

Розглянемо обмеження у вигляді нерівностей. До цієї групи відносяться обмеження, які встановлюються для накопичувача за масогабаритними показниками (m_n – максимальна маса елементів накопичувача, V_n – максимальний об'єм елементів накопичувача), тобто

$$m = m_{LTO} + m_{LFP} + m_{SC} \leq m_n, \quad (19)$$

де m_{LTO} – маса LTO-елементів; m_{LFP} – маса LFP-елементів; m_{SC} – маса суперконденсаторів.

$$V = V_{LTO} + V_{LFP} + V_{SC} \leq V_n, \quad (20)$$

де V_{LTO} – об'єм LTO-елементів; V_{LFP} – об'єм енергоємність LFP-елементів; V_{SC} – об'єм суперконденсаторів.

Враховуючи параметри складових комбінованого накопичувача, перетворимо залежності (19), (20) до вигляду, необхідного для вирішення задачі

$$x_1m_1 + x_2m_2 + x_3m_3 \leq m_n, \quad (21)$$

де m_1 – маса гілки LTO-елементів; m_2 – маса гілки LFP-елементів, m_3 – маса гілки суперконденсаторів.

$$x_1V_1 + x_2V_2 + x_3V_3 \leq V_n, \quad (22)$$

де V_1 – об'єм гілки LTO-елементів, V_2 – об'єм гілки LFP-елементів; V_3 – об'єм гілки суперконденсаторів.

Крім обмежень у вигляді рівностей та нерівностей згідно підходів [2, 3, 10] встановлюємо обмеження щодо параметрів задачі оптимізації

$$\begin{aligned} x_{1min} \leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} \leq x_2 \leq x_{2max}, \\ x_{3min} \leq x_3 \leq x_{3max} \end{aligned} \quad (23)$$

де x_{1min} – мінімальна кількість гілок LTO-елементів; x_{1max} – максимальна кількість гілок LTO-елементів; x_{2min} – мінімальна кількість гілок LFP-елементів; x_{2max} – максимальна кількість гілок LFP – елементів; x_{3min} – мінімальна кількість гілок суперконденсаторів; x_{3max} – максимальна кількість гілок суперконденсаторів.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для накопичувачів, параметри яких наведено у табл. 1, значення обмежень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Обмеження щодо параметрів та початкова точка пошуку при вирішенні задачі оптимізації параметрів комбінованого накопичувача

Table 2

Limitations on the parameters and the starting point of the peck when solving the problem of optimizing the parameters of the combined storage device

i	$X_{i\min}$	$X_{i\max}$	X_{i0}
1	0	47	16
2	0	1 399	466
3	0	93	31

Для вирішення задачі умовної мінімізації застосовуємо програмне середовище MATLAB (США) з комплексом оптимізації optlab (Украї-

на), яке дозволяє обирати велику кількість методів вирішення задачі. Під час низки тестових випробувань найкращий результат отримано при використанні методу Вейля для різних початкових точок пошуку.

Результати

Вирішено задачу пошуку оптимальних конфігурацій комбінованих накопичувачів енергії для різних потужностей, які визначаються режимами руху, профілем і планом колії та навантаженням рухомого складу на plug-in гібридних енергетичних установках рейкового рухомого складу кар'єрного локомотиву, що їх наведено у роботах [1, 8, 9]. Хід вирішення задачі пошуку оптимальних конфігурацій комбінованого накопичувача енергії наведено на рис. 1, де позначено початкову точку – округлою точкою, а кінцеву точку – ромбом.

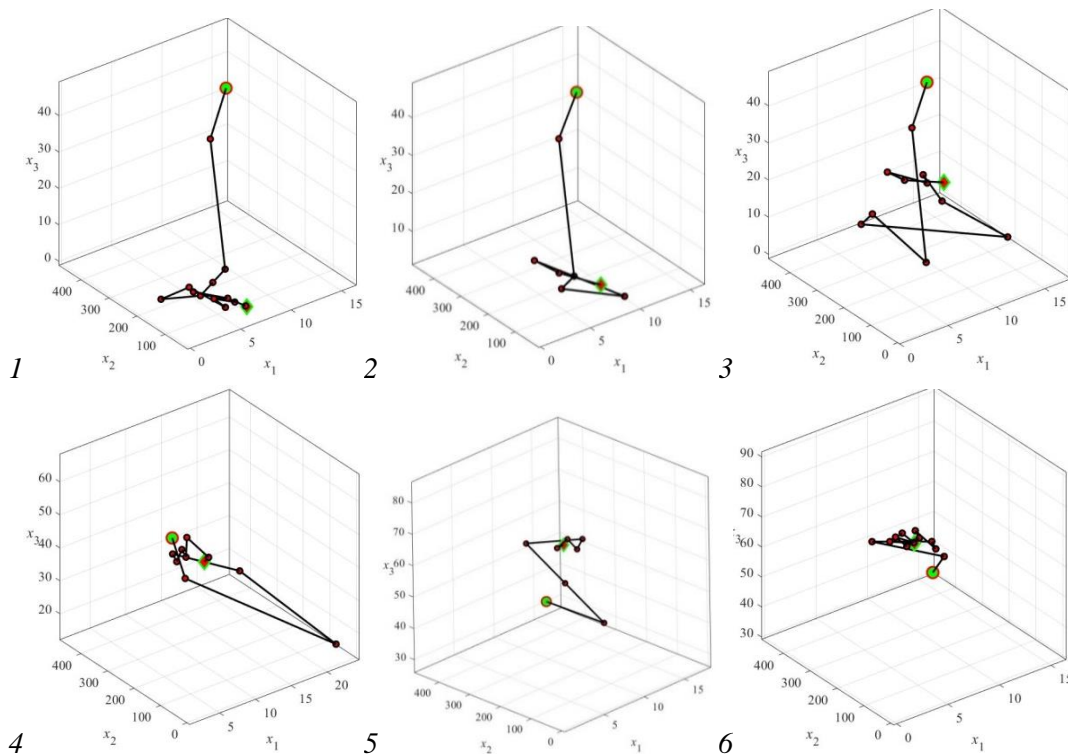


Рис. 1. Хід вирішення задачі пошуку оптимальних параметрів складових комбінованого накопичувача енергії із номінальною потужністю:

1 – 920 кВт.; 2 – 1350 кВт.; 3 – 2500 кВт.; 4 – 3580 кВт.; 5 – 4740 кВт.; 6 – 4949 кВт.

Fig. 1. The course of solving the problem of finding the optimal parameters of the components of a combined energy storage system with a nominal capacity of:

1 – 920 kW.; 2 – 1350 kW.; 3 – 2500 kW.; 4 – 3580 kW.; 5 – 4740 kW.; 6 – 4949 kW.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Загальні результати наведено у табл. 3. Аналіз отриманих загальних результатів доводить наступне. Зі збільшенням заданої потужності зростає кількість гілок суперконденсаторів та зменшується кількість гілок LTO-елементів. Це обумовлено тим фактом, що суперконденсаторні комірки мають найкращі показники потужності заряду/розряду, а LTO-елементи – кращі енергоємні показники. Щодо LFP-елементів, то кількість гілок лежить в межах від 5 до 24, що забезпечує додаткову ємність елементів накопичувача, особливо при середніх значеннях потужності.

Загальна складова ємності LTO-елементів збільшується зі зниженням потужності накопичувача та складає від 11,5 % загальної ємності до 66,4 % при зменшенні потужності з 4 740 кВт до 920 кВт.

Складова ємності суперконденсаторів навпаки – зменшується зі зниженням потужності накопичувача та складає від 70,6 % загальної ємності до 2,4 % при зменшенні потужності з 4949 кВт до 920 кВт, що доводить доцільність використання суперконденсаторів при великих потужностях.

При зменшенні номінальної потужності на-

копичувача загальна маса зменшуються з 14,48 т до 3,26 т, а об'єм з 13,77 м³ до 2,01 м³, що обумовлено зменшенням вимог до накопичувача.

Наукова новизна та практична значимість

Авторами цієї роботи вперше було розроблено методику визначення оптимальних параметрів комбінованого трикомпонентного накопичувача енергії на підставі вирішення задачі умовної мінімізації з урахуванням масогабаритних обмежень.

Практична значимість роботи полягає у визначенні параметрів комбінованих накопичувачів для рухомого складу на прикладі plug-in гібридних енергетичних установок рейкового рухомого складу кар'єрного локомотиву.

Висновки

Перехід з моноелементного до комбінованого накопичувача надає можливість зменшити вартість однієї кіловат-години накопичувача з 7,6 тис.євро/кВт·год до 0,4 тис.євро/кВт·год та з 0,94 тис.євро/кВт·год до 0,345 тис.євро/кВт·год щодо LTO-елементів, LFP – елементів та суперконденсатрів – відповідно.

Table 3

Загальні результати визначення оптимальних параметрів накопичувачів

Table 3

General results of determining the optimal parameters of storage devices

Загальна потужність, кВт	Кількість паралельних гілок LTO-елементів	Кількість паралельних гілок LFP-елементів	Кількість паралельних гілок суперконденсаторних елементів	Маса елементів, т	Об'єм елементів, м ³	Вартість елементів, тис. євро	Вартість однієї кіловат-години накопичувача, тис. євро/кВт·год	Вартість одного кіловату потужності накопичувача, тис. євро/кВт
920	6	31	3	3,26	2,01	40,6	5,547	0,044
1350	6	24	11	4,4	3,19	98,4	2,279	0,071
2500	5	5	37	7,81	6,85	286,8	0,714	0,115
3580	4	7	58	10,9	9,93	445,6	0,501	0,124
4740	1	16	83	13,98	13,31	635,6	0,339	0,134
4949	2	7	85	14,48	13,77	648,1	0,345	0,131

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вартість одного кіловату потужності накопичувача також зменшилась завдяки застосуванню комбінованого накопичувача з 0,223 тис.євро/ кВт, 0, 254 тис.євро/ кВт та з 0,266 тис.євро/ кВт до 0,131 тис.євро/ кВт щодо ЛТО-елементів, LFP-елементів та суперконденсаторів відповідно.

Подяки

Стаття підготовлена при виконанні науково-дослідної роботи «Енергетичний менеджмент у plug-in гібридних тягових системах рейкового рухомого складу, обладнаного багатодвигунним тяговим електроприводом», що фінансується МОН України (№ д/р 0125U001619).

Наведені показники демонструють ефективність технології комбінування елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кондратьева Л. Ю., Рябов Є. С. Попередній аналіз варіантів побудови бортової системи накопичення енергії електровозу. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених*: матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів (Харків, 14–16 грудня 2022 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 182–183.
2. Северин В. П., Нікуліна О. М. *Методи та алгоритми одновимірної оптимізації* : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. 115 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/30e90c7a-f2df-447d-aa54-e163f5b46573>
3. Северин В. П. *Методи багатовимірної безумовної мінімізації* : навч. посіб. з курсу «Методи оптимізації». Харків : НТУ «ХПІ», 2013. 160 с.
4. Akbarzadeh M., De Smet J., Stuyts J. Battery Hybrid Energy Storage Systems for Full-Electric Marine Applications. *Processes*. 2022. Vol. 10, Iss. 11. P. 2418. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112418>
5. Avila A., Lucu M., Garcia-Bediaga A., Ibarguren U., Gandiaga I., Rujas A. Hybrid Energy Storage System Based on Li-Ion and Li-S Battery Modules and GaN-Based DC-DC Converter. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 132342–132353. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3114785>
6. Becker J., Nemeth T., Wegmann R., Sauer D. U. Dimensioning and Optimization of Hybrid Li-Ion Battery Systems for EVs. *World Electric Vehicle Journal*. 2018. Vol. 9, Iss. 2. P. 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj9020019>
7. ENERpower 26650 LiFePo4 3.2V 3000mAh (10C). *Enerprof*. URL: <https://enerprof.de/en/products/enerpower-26650-lifepo4-3-2v-3000mah-10c>.
8. Goolak S., Kondratieva L., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Makaras R. Research and Optimization of Hybrid On-Board Energy Storage System of an Electric Locomotive for Quarry Rail Transport. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 7. P. 3293. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073293>
9. Kondratieva L., Overianova L., Tkachenko V., Riabov I., Demydov O. Simulation of the operation of the on-board energy storage in the tractional system of a quarry locomotive. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 43. P. 136–148. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-11>
10. Liubarskyi B., Iakunin D., Nikonov O., Liubarskyi D., Yeritsyan B. Optimizing geometric parameters for the rotor of a traction synchronous reluctance motor assisted by partitioned permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, No 8(116). P. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254373>
11. New 2.7V 3000F Cell Datasheet. *Maxwell Technologies*. URL: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/09/3003279.2_Final-DS_New-2.7V-3000F-Cell_20210406.pdf
12. Yinlong LTO Batteries. *Yinlong Energy*. URL: <https://www.yinlong.energy/yinlong-battery#footer>

B. G. LIUBARSKYI^{1*}, S. G. BURIKOVSKIY², O. Yd. KHAUSTOV³, M. I. STETSENKO⁴

^{1*}Dep. of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (067) 993 75 69, e-mail Borys.Liubarskyi@kphi.edu.ua, ORCID 0000-0002-2985-7345

²Research and Design Institute «Molniya», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47 Shevchenko St., Kharkiv, Ukraine, 61013, tel. +38 (057) 707 61 33, e-mail e-mail nii90@email.ua, ORCID 0000-0001-9422-6390

³Dep. of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 63 67, e-mail hausz91@gmail.com, ORCID 0009-0001-0363-6173

⁴Dep. of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 63 67, e-mail mail Maksym.Stetsenko@iee.kphi.edu.ua, ORCID 0009-0008-1594-2902.

Determination of the Constituent Elements of a Three-Component Hybrid Energy Storage Device for a Plug-In Power Plant for Rolling Stock

Purpose. The study is aimed at determining the quantitative components of a hybrid three-component energy storage device for a plug-in power plant of rolling stock. **Methodology.** It was determined that according to the criteria of mass, volume, cost and cost of one kilowatt-hour, none of the options for a single-element storage device simultaneously provides the minimum indicators for all criteria. Thus, it is rational to use a combined three-component energy storage device. An algorithm for setting the problem of conditional minimization of the cost of elements of a three-component combined storage device is considered, which includes the following: 1) setting the objective function in the form of the total cost of the elements; 2) determining the parameters – the number of branches of each type of storage device; 3) setting restrictions on the given energy capacity, power, mass and dimensions and restrictions on the parameters; 4) determining the method for solving the problem, which is the Weyl method. **Findings.** The authors proved: 1) Analysis of the obtained general results proves the following. With an increase in the specified power, the number of branches of supercapacitors increases and the number of branches of LTO cells decreases. This is due to the fact that supercapacitor cells have the best charge/discharge power indicators, and LTO cells have the best energy-intensive indicators. As for LFP cells, the number of branches ranges from 5 to 24, which provides additional capacity of the storage elements, especially at medium power values; 2) The total capacity component of LTO cells increases with a decrease in the storage power and is 11.5% of the total capacity to 66.4% when the power is reduced from 4,740 kW to 920 kW. The component capacity of supercapacitors, on the contrary, decreases with a decrease in the storage capacity and is 70.6% of the total capacity to 2.4% when the capacity decreases from 4,949 kW to 920 kW, which is due to the expediency of using supercapacitors at high capacities. **Originality.** The authors of this work have for the first time developed a method for determining the optimal parameters of a combined three-component energy storage based on solving the problem of conditional minimization taking into account mass and dimensional constraints. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to determine the parameters of combined storage for rolling stock using the example of plug-in hybrid power plants of rail rolling stock of a quarry locomotive.

Keywords: plug-in power plant; combined energy storage; rail transport; conditional optimization; number of storage branches

REFERENCES

1. Kondratieva, L. Yu., & Riabov, Ye. S. (2022, December). Poperednii analiz variantiv pobudovy bortovoi systemy nakopychennia enerhii elektrovozu. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh: materialy KhVI Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii mahistrantiv ta aspirantiv* (pp. 182-183). Kharkiv: NTU «KhPI», Ukraine. (in Ukrainian)
2. Severyn, V. P., & Nikulina, O. M. (2025). *Metody ta alhorytmy odnovymirnoi optymizatsii* : navch. posib. Kharkiv, Ukraine. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/30e90c7a-f2df-447d-aa54-e163f5b46573> (in Ukrainian)
3. Severyn, V. P. (2013). *Metody bahatovymirnoi bezumovnoi minimizatsii* : navchalnyi posibnyk z kursu «Metody optymizatsii». Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
4. Akbarzadeh, M., De Smet, J., & Stuyts, J. (2022). Battery hybrid energy storage systems for full-electric marine applications. *Processes*. 10(11), 2418. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112418> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. Avila, A., Lucu, M., Garcia-Bediaga, A., Ibarguren, U., Gandiaga, I., & Rujas, A. (2021). Hybrid energy storage system based on Li-Ion and Li-S battery modules and GaN-based DC-DC converter. *IEEE Access*, 9, 132342-132353. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3114785> (in English)
6. Becker, J., Nemeth, T., Wegmann, R., & Sauer, D. U. (2018). Dimensioning and optimization of hybrid Li-Ion battery systems for EVs. *World Electric Vehicle Journal*, 9(2), 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj9020019> (in English)
7. ENERpower 26650 LiFePo4 3.2V 3000mAh (10C). (n. d.). *Enerprof*. URL: <https://enerprof.de/en/products/enerpower-26650-lifepo4-3-2v-3000mah-10c> (in English)
8. Goolak, S., Kondratieva, L., Riabov, I., Lukoševičius, V., Keršys, A., & Makaras, R. (2023). Research and optimization of hybrid on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry rail transport. *Energies*, 16(7), 3293. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073293> (in English)
9. Kondratieva, L., Overianova, L., Tkachenko, V., Riabov, I., & Demydov, O. (2024). Simulation of the operation of the on-board energy storage in the traction system of a quarry locomotive. *Transport Systems and Technologies*, 43, 136-148. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-11> (in English)
10. Liubarskyi, B., Iakunin, D., Nikonov, O., Liubarskyi, D., & Yeritsyan, B. (2022). Optimizing geometric parameters for the rotor of a traction synchronous reluctance motor assisted by partitioned permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8(116)), 38-44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254373> (in English)
11. New 2.7V 3000F Cell Datasheet. (2021). *Maxwell Technologies*. URL: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/09/3003279.2_Final-DS_New-2.7V-3000F-Cell_20210406.pdf (in English)
12. Yinlong LTO Batteries. (n. d.). *Yinlong Energy*. URL: <https://www.yinlong.energy/yinlong-battery#footer> (in English)

Надійшла до редколегії: 14.05.2025

Прийнята до друку: 22.09.2025

УДК 629.4.077-592:519.6

О. В. НЕВЕДРОВ^{1*}, О. М. ГОРОБЧЕНКО², Д. О. ЗАЙКА³, В. С. ТЕРЕЩЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (097) 301 28 97, ел. пошта nvp2020lts@gmail.com, ORCID 0000-0001-9347-0973

²Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (050) 972 04 71, ел. пошта gorobchenko.a.n@gmail.com, ORCID 0000-0002-9868-3852

³Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (066) 836 09 91 71, ел. пошта zaika_do@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0000-0003-0693-9580

⁴Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (068) 794 65 80, ел. пошта tereschenko_vs@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0009-0006-7906-7284

Прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза із застосуванням Марковського методу аналізу

Мета. У статті розглянуто питання прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза з використанням Марковського методу аналізування. Метою дослідження є побудова математичної моделі, що дозволяє з високою точністю оцінювати поточний та майбутній технічний стан системи на основі статистичних даних. Запропонована модель дає змогу формалізувати переходи між технічними станами –справний, частково несправний критичний і відновлений, – що дозволяє здійснювати ефективне планування технічного обслуговування. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі побудуємо математичну модель прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза на основі дискретного Марковського процесу з чотирма станами: «справний», «частково несправний», «критичний», «відновлений». Ця модель дозволяє формалізувати ймовірності переходу між станами в дискретні моменти часу та оцінювати динаміку деградації системи. Множин станів системи представлена як «справний» (нормальне функціонування, технічне обслуговування – ТО – не потрібне), «частково несправний» (потрібна додаткова діагностика або ТО), «критичний стан» (стан відмови, що потребує ремонту або заміни вузла – поглинаючий стан), «відновлений» (після ремонту, стан близький до початкового). Побудовано структуру матриці переходів та позначимо ймовірність переходу зі стану в стан. **Результати.** На основі вище наведених даних побудовано вектор середнього часу до поглинання. **Наукова новизна.** Новизна роботи полягає у отриманні матриці N , що містить інформацію про очікувану кількість разів, коли система, починаючи з певного початкового стану, може переходити або залишається в прийнятному стані до попадання в поглинаючий критичний стан. Це дає змогу виявити слабкі місця, а саме часті повернення в частково несправний стан. Також можливо визначити динаміку деградації гальмівної системи і, в залежності від неї, оптимізувати технічне обслуговування. **Практична значимість.** В рамках проведеного дослідження було побудовано формалізовану математичну модель гальмівної системи тепловоза у вигляді дискретного Марковського процесу з чотирма визначеними технічними станами.

Ключові слова: залізничний транспорт; локомотив; технічний стан; діагностика; прогнозування; контроль; Марковський процес; ланцюг Маркова

Вступ

Надійність та ефективність гальмівної системи тепловоза є критично важливою складовою безпеки залізничного транспорту. Особливої уваги потребують маневрові та магістральні тепловози, які експлуатуються понад п'ятдесят років, часто в умовах підвищеного зносу. Зниження технічного стану гальмівного обладнання може призводити до зростання гальмівного шляху, порушень динаміки руху та навіть до

аварійних ситуацій. Одним із актуальних завдань є створення моделі, що дозволить здійснювати прогнозування стану гальмівної системи з урахуванням попередніх станів та можливих переходів між ними. Такий підхід відкриває можливості для персоніфікованого технічного обслуговування, що підвищує ефективність планових ремонтів.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У науковій літературі активно розвиваються підходи до діагностики та прогнозування технічного стану залізничного обладнання [7, 17, 20]. Особливої уваги заслуговують дослідження з використанням стохастичних моделей, теорії штучного інтелекту [2, 10], підвищення ефективності експлуатації та управління інфраструктурою залізничного транспорту на основі максимальних рівнів відмовостійкості та теорії надійності [2, 5, 10–12]. Так, у роботах [4, 9, 10] представлено методи діагностики гальмівних систем на основі аналізу експлуатаційних параметрів та результатів обслуговування. Використання логіко-імовірнісних моделей та функцій стану дозволяє оцінювати поточний рівень зносу окремих елементів системи. У дослідженнях [1, 3, 6, 14, 16] Марковські процеси були запропоновані як ефективний інструмент моделювання змін технічного стану, які застосовуються для опису переходів між різними технічними станами вузлів локомотива і враховують відмови та ремонт. У дослідженнях [10] було показано, що застосування методів прогнозування на основі Марківських процесів дозволяє зменшити кількість несподіваних відмов на 15–25 %, забезпечуючи тим самим зростання безпеки руху. Проте недостатньо розробленими залишаються моделі, що безпосередньо орієнтовані на гальмівну систему тепловоза як об'єкт дослідження.

Мета

Метою статті є побудова формалізованої математичної моделі гальмівної системи тепловоза у вигляді дискретного Марковського процесу з чотирма станами. Для цього необхідно вирішити наступні завдання: побудувати матриці ймовірностей переходів між станами для гальмівної системи; провести імітаційне моделювання змін станів у часі.

Методика

Побудуємо математичну модель прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза на основі дискретного Марковського процесу [8, 9, 13] з чотирма станами: «справний», «частково несправний», «критичний», «відновлений». Ця модель дозволяє формалізувати ймовірності переходу між станами в дискретні моменти часу та оцінювати динаміку деградації системи. Позначимо множину станів

системи як $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, де S_1 – «справний» (нормальне функціонування, технічне обслуговування – ТО – не потрібне); S_2 – «частково несправний» (потрібна додаткова діагностика або ТО); S_3 – «критичний стан» (стан відмови, що потребує ремонту або заміни вузла – поглинаючий стан); S_4 – «відновлений» (після ремонту, стан близький до початкового). Побудуємо структуру матриці переходів та позначимо ймовірність переходу зі стану S_i в стан S_j як p_{ij} [14]. Структура матриці переходів P з одного стану до іншого наведена нижче у формулі (1),

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де p_{ij} – ймовірність переходу зі стану S_i в стан S_j , рядок i – поточний стан системи S_i ; стовпчик j – стан у який може перейти система S_j .

Пояснення цієї структури [9, 14]:

S_3 – поглинаючий стан (якщо система досягає критичного стану, вона в ньому залишається до втручання $\rightarrow p_{33} = 1$);

S_4 – відновлений стан (після ремонту може повернутися у справний стан або залишитися у «відновленому»).

Сума ймовірностей в рядках повинна дорівнювати одиниці ($\sum p_{i\Box} = 1$ для кожного i).

Проведемо розрахунок розподілу ймовірностей у часі:

$$\pi(t+1) = \pi(t) \cdot P, \quad (2)$$

де $\pi(t)$ – вектор ймовірностей станів на час t .

$$\pi(t) = [\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_n(t)],$$

де $\pi_i(t)$ – це ймовірність того, що система перебуває в стані S_i на час t .

Вираз (2) є основним рівнянням еволюції дискретного Марковського процесу. Він описує, як змінюється розподіл ймовірностей станів системи з кожним тактом. У контексті дискретного Марковського процесу, зокрема при моделюванні технічного стану гальмівної системи локомотива, термін «такт» означає: один дискретний крок у часі [13, 15, 18–20], на якому може відбутися перехід системи з одного стану

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

до іншого в нашому випадку дорівнює одному місяцю.

Кожен елемент матриці переходів (1) це ймовірність переходу зі стану i у стан j . Вираз (3) є рекурентним рівнянням для обчислення ймовірності того, що система буде перебувати у стані S_j на момент часу $t+1$ у дискретному Марковському процесі.

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \cdot p_{ij}, \quad (3)$$

де $\pi_j(t+1)$ – це ймовірність того, що на момент часу $t+1$ система буде у стані S_j ; $\pi_i(t)$ – ймовірність того, що на момент часу t система перебуває у стані S_i ; p_{ij} – ймовірність переходу зі стану

S_i в стан S_j за один такт, n – загальна кількість станів у моделі (у нашому випадку – 4).

Формула обчислює нову ймовірність перебування у стані S_j наступного такту як суму всіх можливих шляхів, які могли призвести до стану S_j з будь-якого стану S_i , з урахуванням: наскільки ймовірно система була в стані S_i (тобто $\pi_i(t)$) і наскільки ймовірно з стану S_i перейти до стану S_j (тобто p_{ij}). Приведемо детальний приклад розрахунку за формулою (3).

Для побудови матриці переходів гальмівної системи тепловоза на основі статистичного аналізу даних, враховуючи початкову ймовірність перебування у стані $\pi_{(0)} = [S_1 = 0,991, S_2 = 0,005, S_3 = 0,002, S_4 = 0,002]$, пропонується використати дискретний Марківський процес із чотирма станами. Матриця переходів P буде мати наступний вигляд наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Матриця переходів P

Table 1

Transition matrix P

З / До	S_1	S_2	S_3	S_4	Σ
S_1	0,85	0,10	0,03	0,02	1,0
S_2	0,05	0,75	0,15	0,05	1,0
S_3	0,00	0,00	1,00	0,00	1,0
S_4	0,90	0,00	0,00	0,10	1,0

Інтерпретація станів:

$S_1 \rightarrow S_1$ (0,85): 85 % залишаються справними наступного місяця;

$S_1 \rightarrow S_2$ (0,10): у 10 % випадків виявляється часткова несправність;

$S_1 \rightarrow S_3$ (0,03): раптова критична відмова (3 %);

$S_1 \rightarrow S_4$ (0,02): перехід на ТО, відновлення;

$S_2 \rightarrow S_3$ (0,15): зростає ризик погіршення без обслуговування;

$S_2 \rightarrow S_1$ (0,05): можлива хибна діагностика або дрібне усунення;

$S_2 \rightarrow S_4$ (0,05): ремонт чи профілактика;

$S_3 \rightarrow S_3$ (1,00): стан поглинання — без ремонту система не змінює стан;

$S_4 \rightarrow S_1$ (0,90): успішне відновлення після ремонту;

$S_4 \rightarrow S_4$ (0,10): залишкові проблеми/повторний контроль.

Матриця описує ймовірнісну динаміку зносу та відновлення гальмівної системи. Ця модель дозволяє прогнозувати технічний стан гальмівної системи тепловоза у дискретні моменти часу та оцінювати динаміку її деградації.

На рис. 1 зображено граф модель змін технічного стану гальмівної системи тепловоза протягом 12 місяців.

Вершини – чотири технічні стани (S_1 : справний, S_2 : частково несправний, S_3 : критичний, S_4 : відновлення).

Стрілки – напрямки змін між станами з відповідними вагами (сумарні прирости ймовірностей протягом часу).

Чим більші ваги – тим частіше або значніше система переходила в цей стан за період.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

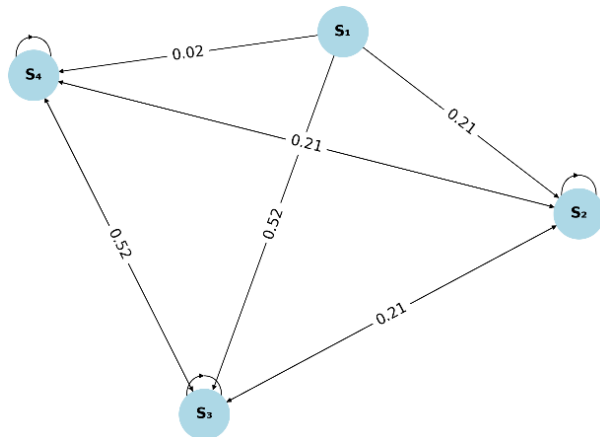


Рис. 1. Граф переходів між технічними станами за 12 місяців

Fig. 1. Graph of transitions between technical states over 12 months

Цей граф допомагає візуалізувати основні траєкторії деградації, наприклад:

$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3$ – типовий шлях поступового зносу;

$S_4 \rightarrow S_1$ – повернення до нормального стану після ремонту.

Щоб визначити ймовірність того, що система врешті перейде до поглинаючого стану, будемо

фундаментальну матрицю N для симуляції подальшої поведінки гальмівної системи локомотива, включаючи: побудову Q -матриці (непоглинаючі стани).

$$N = (I - Q)^{-1}, \quad (4)$$

де N – фундаментальна матриця, яка описує очікувану кількість разів, коли система побуває у кожному непоглинаючому стані до моменту переходу у поглинаючий; I – одинична матриця такого ж розміру, як Q ; Q – підматриця ймовірностей переходів між непоглинаючими станами, тобто станами, з яких можливі подальші переходи; $(\cdot)^{-1}$ – обернена матриця.

Загальна об'єднана матриця ймовірностей переходів P (усереднена з усіх модулів) має структуру (1).

Оскільки S_3 є поглинаючим станом, ми будемо Q як підматрицю для станів S_1, S_2, S_4 :

$$Q = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix} \Rightarrow (\text{розмірність } 3 \times 3)$$

Визначення кожного елемента фундаментальної матриці N наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Визначення кожного елемента фундаментальної матриці N

Table 2

Determination of each element of the fundamental matrix N

Елемент N_{ij}	Пояснення
N_{S_1, S_1}	Очікувана кількість тактів у стані справності, починаючи з S_1
N_{S_1, S_2}	Очікувана кількість разів у частково несправному стані, починаючи з S_1
N_{S_2, S_4}	Скільки разів система потрапить у стан «відновлено», почавши з частково несправного
...	І так далі для кожної пари станів

На основі статистичного аналізу даних експлуатації гальмівного обладнання тепловозів визначено наступні ймовірності переходів між станами (усереднено для всієї системи):

$$P = \begin{pmatrix} 0,85 & 0,10 & 0,03 & 0,02 \\ 0,05 & 0,75 & 0,15 & 0,05 \\ 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \\ 0,90 & 0,00 & 0,00 & 0,10 \end{pmatrix}$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Стан S_3 – поглинаючий, решта – непоглинаючі. Вилучаємо з P рядки та стовпці, які відповідають поглинаючим станам. Залишаються тільки S_1, S_2, S_4 .

Виділення матриці Q (непоглинаючі стани):

$$Q = \begin{pmatrix} 0,85 & 0,10 & 0,03 & 0,02 \\ 0,05 & 0,75 & 0,15 & 0,05 \\ 0,90 & 0,00 & 0,00 & 0,10 \end{pmatrix}$$

Побудуємо одиничну матрицю I :

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Проводимо обчислення $I-Q$:

$$I-Q = \begin{pmatrix} 1-0,85 & 0-0,10 & 0-0,03 & 0-0,02 \\ 0-0,05 & 1-0,75 & 0-0,15 & 0-0,05 \\ 0-0,90 & 0,00 & 1-0,10 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,15 & 0,10 & 0,03 & 0,02 \\ 0,05 & 0,25 & 0,15 & 0,05 \\ 0,90 & 0,00 & 0,90 & 0 \end{pmatrix}$$

Для обчислення оберненої матриці $N = (I-Q)^{-1}$ використовується стандартний метод обернення матриць (алгебраїчні доповнення або числове програмне обчислення). Припустимо що ми отримуємо наступні дані матриці N наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Отриманні дані матриці N

Table 3

Obtained data of matrix N

Початковий / Поточний стан	S_1	S_2	S_4
S_1 (справний)	11,1111	4,4444	0,4938
S_2 (частково несправний.)	4,4444	5,7778	0,4198
S_4 (відновлений)	11,1111	4,4444	1,6049

$N_{11} = 11,11$ означає, що якщо система стартує у стані S_1 , то в середньому вона буде в ньому 11,1 місяця до відмови.

$N_{14} = 0,49$ означає, що, починаючи з технічного стану S_1 (справний), система в середньому затримується у стані відновлення (S_4) приблизно на 0,49 дискретних тактів, що при місячному дискретному інтервалі дорівнює приблизно 0,49 місяця.

Результати

На основі вище наведених даних побудуємо вектор середнього часу до поглинання.

$$t = N \cdot 1, \quad (5)$$

де N – фундаментальна матриця (3×3); 1 – вектор-стовпчик одиниць (3×1); t – вектор середньої кількості тактів до поглинання кожного початкового стану.

Якщо використовувати матрицю N :

та

$$1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Тоді:

$$t_{S_1} = 11,1111 + 4,4444 + 0,4938 \approx 16,05$$

$$t_{S_2} = 4,4444 + 5,7778 + 0,4198 \approx 10,64$$

$$t_{S_4} = 11,1111 + 4,4444 + 1,6049 \approx 17,16$$

Отже, середній час до попадання у критичний стан (S_3) наведений у табл. 4.

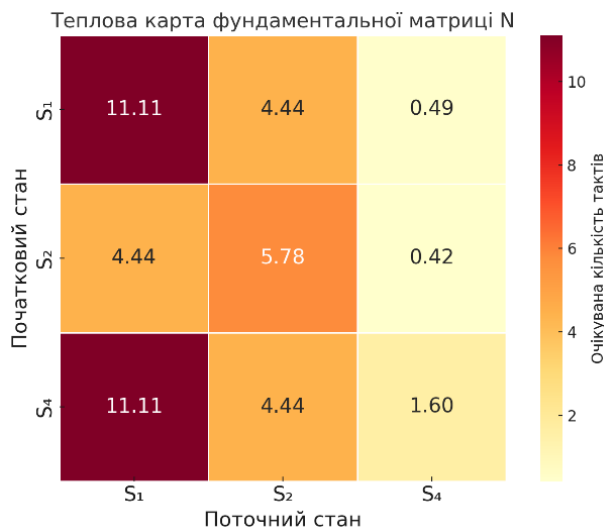
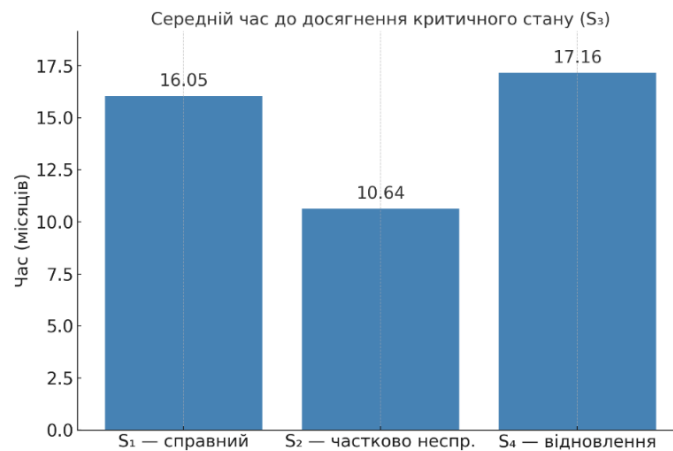
Таблиця 4
Середній час до попадання
у критичний стан (S_3)

Table 4

Average time to critical condition (S_3)

Початковий стан	Середній час до поглинання (місяців)
S_1	~16,05
S_2	~10,64
S_4	~17,16

Проведемо візуалізацію фундаментальної матриці та побудуємо теплову картку (рис. 2).

Рис. 2. Теплова карта фундаментальної матриці N Fig. 2. Heat map of the fundamental matrix N Рис. 3. Середній час до поглинання (потрапляння у критичний стан S_3)Fig. 3. Average time to absorption (reaching critical state S_3)

Теплова карта фундаментальної матриці N , показує:

як довго система в середньому перебуватиме у кожному з непоглинаючих станів (S_1 , S_2 , S_4), перш ніж потрапити у критичний стан (S_3);

значення по осі Y – початковий стан, по осі X – спостережуваний стан до поглинання; найтемніші клітинки відповідають найбільшому очікуваному часу перебування.

Наприклад:

починаючи з S_1 , система найдовше затримується у S_1 (~11,11 тактів);

починаючи із S_4 , вона також часто повертається у S_1 .

На рис. 3 побудовано графік на якому зображено середній час до досягнення критичного стану (S_3) для кожного з трьох початкових технічних станів гальмівної системи:

S_1 (справний): $\approx 16,05$ місяців – досить стабільний стан;

S_2 (частково несправний): $\approx 10,64$ місяця – найшвидше потрапляє у критичний стан;

S_4 (відновлення): $\approx 17,16$ місяців – найдовший термін без відмови після ремонту.

Цей аналіз допомагає визначити, з якого стану найвигідніше підтримувати експлуатацію системи та як часто слід проводити технічне обслуговування.

Наукова новизна та практична значимість

Новизна роботи полягає у отриманні матриці N , що містить інформацію про очікувану кількість разів, коли система, починаючи з певного початкового стану, може переходити або залишається в прийнятному стані (S_1, S_2, S_4) до попадання в поглинаючий критичний стан (S_3). Це дає змогу: виявити слабкі місця – наприклад, часті повернення в частково несправний стан; визначити динаміку деградації; оптимізувати політику обслуговування залежно від профілю деградації. Фундаментальна матриця N є базовим блоком для побудови інтегральних моделей ризику, які дозволяють: оцінити комплексний технічний стан всієї гальмівної системи на будь-який момент часу; сформулювати гнучкі графіки технічного обслуговування, які ґрунтуються на фактичному стані, а не лише на пробігу; сприяє створенню інтегрованих показників надійності системи, побудові інфраструктури предиктивного обслуговування, зниженню

експлуатаційних витрат та підвищенню безпеки руху. Фундаментальна матриця N є не лише інструментом теоретичного аналізу, а й практичним інструментом для впровадження цифрової стратегії управління надійністю у сучасному залізничному транспорті. Її використання відкриває можливості для: цифровізації технічної діагностики; адаптивного планування обслуговування; створення інфраструктури інтелектуального обслуговування тепловозів.

Висновки

В рамках проведеного дослідження було побудовано формалізовану математичну модель гальмівної системи тепловоза у вигляді дискретного Марковського процесу з чотирма визначеними технічними станами: S_1 – справний стан (нормальне функціонування); S_2 – частково несправний стан (потребує діагностики або технічного обслуговування); S_3 – критичний стан (відмова, потребує ремонту); S_4 – відновлення стан (після ремонту, частково повернене ресурсне значення). Для побудови даної моделі було вирішено такі завдання:

1. Побудована матриця ймовірностей переходів між станами на основі статистичних даних та експертних оцінок та історичних експлуатаційних даних сформовано матрицю переходів P , що описує ймовірності переходу між усіма технічними станами гальмівної системи. Особливістю моделі є наявність поглинаючого стану S_3 , який фіксує незворотно відмову без зовнішнього втручання.

2. Імітаційне моделювання зміни станів у часі було проведено дискретне моделювання динаміки вектора станів $\pi(t)$, що відображає розподіл ймовірностей перебування системи у кожному з чотирьох станів у кожний момент часу. Графічно відображено процес деградації: ймовірність перебування у стані S_3 (відмова) зростає з часом, що підтверджує релевантність обраної моделі до умов експлуатаційного зносу. Розглядаючи перспективи впровадження наведеного дослідження, можна сказати, що розроблена математична модель дозволяє не лише кількісно аналізувати процес старіння та відмов гальмівної системи, а й формувати оптимальні стратегії технічного обслуговування на основі ймовірнісного прогнозування. Застосування такої моделі у практиці експлуатації локомотивів дозволить: знизити ризики аварій, підвищити ефективність управління технічним станом тягового рухомого складу, реалізувати цифрові сервіси діагностики та підтримки рішень у сфері технічного менеджменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *V Міжнародна науково-практична конференція «Безпека на транспорті – основа ефективної інфраструктури: проблеми та перспективи»* : матеріали конф., м. Харків, 10–11 листоп. 2022 р. Харків, 2022. 119 с. URL: <https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=3829>
2. Горобченко О. М., Заїка Д. О. Створення математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2024. Вип. 208. С. 146–162. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308485>
3. *ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT)*. Чинний від 2014-07-01. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 80 с.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Лобатюк Ю. А., Мокін О. Б., Мокін Б. І. *Методи і засоби технічної діагностики гальмівної системи електропоїзда* : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2018. 100 с.
5. Неведров О. В. Розвиток теоретичних основ оптимізації та оцінки якості управління тяговим рухомих складом. *Транспортні системи і технології*. 2020. Вип. 36. С. 24–32.
DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-3>
6. Пальчевський Б. О. Класифікація і аналіз технологічних машин за характером взаємодії їх робочих і інформаційних процесів. *Технологічні комплекси*. 2019. № 1. С. 5–20.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tehkom_2019_1_3
7. Bodnar B., Ochkasov O., Petrenko V., Martishevskij M. Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology : Proc. of the 13th Intern. Conf.*, Sept. 15–16, 2022, Vilnius, Lithuania. Cham, 2023. P. 726–736. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70
8. Craig B. A., Sendi P. P. Estimation of the transition matrix of a discrete-time Markov chain. *Health Economics*. 2002. Vol. 11, Iss. 1. P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.1002/hec.654>
9. Dufour F., Prieto-Rumeau T. Nash Equilibria for Total Expected Reward Absorbing Markov Games: The Constrained and Unconstrained Cases. *Applied Mathematics & Optimization*. 2024. Vol. 89, Iss. 2. 34.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00245-023-10095-1>
10. Gorobchenko O., Holub H., Zaika D. Theoretical basics of the self-learning system of intelligent locomotive decision support systems. *Archives of Transport*. 2024. Vol. 71, Iss. 3. P. 169–186.
DOI: <https://doi.org/10.61089/aot2024.gaevsp41>
11. Gorobchenko O., Matsiuk V., Holub H., Gritsuk I., Nevedrov O. Increasing the efficiency of operation and management of railroad transport infrastructure based on maximum levels of fault tolerance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5, Iss. 3 (131). P. 55–65.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311829>
12. Gorobchenko O., Nevedrov O. Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*. 2020. Vol. 56, Iss. 4. P. 47–58.
DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517>
13. Grussing M. N., Liu L. Y., Uzarski D. R., El-Rayes K., El-Gohary N. Discrete Markov approach for building component condition, reliability, and service-life prediction modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30, Iss. 5. 04016015.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000865](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000865)
14. He W., Sun Y. Stationary Markov perfect equilibria in discounted stochastic games. *Journal of Economic Theory*. 2017. Vol. 169. P. 35–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jet.2017.01.007>
15. Hernández-Lerma, O., Lasserre J. B. *Discrete-Time Markov Control Processes. Basic Optimality Criteria*. New York : Springer, 1996. 230 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0729-0>
16. Martins A., Fonseca I., Farinha J., Reis J., Cardoso A. J. M. Maintenance Prediction through Sensing Using Hidden Markov Models – A Case Study. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 16. 7685.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167685>
17. Moiseenko V., Kameniev O., Gaievskiy V. Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2017. Вип. 3, № 9(87). С. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005>
18. Stewart W. J. *Introduction to the numerical solution of Markov chains*. Princeton : Princeton University Press, 1994. 568 p.
19. Tang D., Cao J., Yu J. Remaining useful life prediction for engineering systems under dynamic operational conditions: A semi-Markov decision process-based approach. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(3), P. 627–638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.015>
20. Vale C., Simões M. L. Prediction of Railway Track Condition for Preventive Maintenance by Using a Data-Driven Approach. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, Iss. 3. 34.
DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030034>

O. V. NEVEDROV^{1*}, O. M. GOROBCHENKO², D. O. ZAIKA³, V. S. TERESHCHENKO⁴^{1*}Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (097) 301 28 97, e-mail nvp2020lts@gmail.com, ORCID 0000-0001-9347-0973²Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 972 04 71, e-mail gorobhenko.a.n@gmail.com, ORCID 0000-0002-9868-3852³Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (066) 836 09 91 71, e-mail zaika_do@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0000-0003-0693-9580⁴Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (068) 794 65 80, e-mail tereshchenko_vs@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0009-0006-7906-728

Prediction of the Technical Condition of the Brake System of a Diesel Locomotive using the Markov Analysis Method

Purpose. The article considers the issue of predicting the technical condition of the brake system of a diesel locomotive using the Markov analysis method. The purpose of the study is to build a mathematical model that allows for high-precision assessment of the current and future technical condition of the system based on statistical data. The proposed model allows for formalizing transitions between the technical states of serviceable, partially faulty, critical, and restored, which allows for effective maintenance planning. **Methodology.** To solve the problem, we will build a mathematical model for predicting the technical condition of the brake system of a diesel locomotive based on a discrete Markov process with four states: «serviceable», «partially faulty», «critical», «restored». This model allows for formalizing the probabilities of transitions between states at discrete points in time and assessing the dynamics of system degradation. The set of system states is represented as «serviceable» (normal functioning, no maintenance required), «partially faulty» (additional diagnostics or maintenance required), «critical state» (failure state requiring repair or replacement of a node – absorbing state), «restored» (after repair, the state is close to the initial state). The structure of the transition matrix is constructed and the probability of transition from state to state is denoted. **Finding.** Based on the above data, the vector of the average time to absorption is constructed. **Originality.** The novelty of the work lies in obtaining the matrix N , which contains information about the expected number of times when the system, starting from a certain initial state, can transition or remain in an acceptable state until it enters an absorbing critical state. This makes it possible to identify weaknesses, namely frequent returns to a partially faulty state. It is also possible to determine the dynamics of the degradation of the brake system and, depending on it, optimize maintenance. **Practical value.** As part of the research, a formalized mathematical model of the locomotive brake system was constructed in the form of a discrete Markov process with four defined technical states.

Keywords: railway transport; locomotive; technical state; diagnostics; forecasting; control; Markov process; Markov chain

REFERENCES

1. Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet (2022). *V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Bezpeka na transporti – osnova efektyvnoi infrastruktury: problemy ta perspektyvy»*: materialy konferentsii. Kharkiv, Ukraine. Retrieved from <https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=3829> (in Ukrainian)
2. Gorobchenko, O., & Zaika, D. (2024). Development of a Mathematical Model for Determining Traction and Energy Performance Indicators of a Maneuvering Locomotive. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 208, 146-162. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308485> (in Ukrainian)
3. *Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsyniuvannia ryzyku*, 80 DSTU IEC/ISO 31010:2013 (2015). (in Ukrainian)
4. Lobatiuk, Yu. A., Mokin, O. B., & Mokin, B. I. (2018). *Metody i zasoby tekhnichnoi diahnostryky halmivnoi systemy elektropoizda*: monohrafiia. Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
5. Nevedrov, O. V. (2020). Development of Theoretical Fundamentals of Optimization and Quality Assessment of Traction Rolling Stock Management. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 36, 24-32. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-3> (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Palchevskiy, B. O. (2019). Classification and Analysis of Technological Machines by the Nature of the Interaction of Their Working and Information Processes. *Tekhnologichni kompleksi*, 1, 5-20. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tekom_2019_1_3 (in Ukrainian)
7. Bodnar, B., Ochkasov, O., Petrenko, V., & Martishevskij, M. (2023). Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology*, 726-736. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70 (in English)
8. Craig, B. A., & Sendi, P. P. (2002). Estimation of the transition matrix of a discrete- time Markov chain. *Health Economics*, 11(1), 33-42. DOI: <https://doi.org/10.1002/hec.654> (in English)
9. Dufour, F., & Prieto-Rumeau, T. (2024). Nash Equilibria for Total Expected Reward Absorbing Markov Games: The Constrained and Unconstrained Cases. *Applied Mathematics & Optimization*, 89(2), 34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00245-023-10095-1> (in English)
10. Gorobchenko, O., Holub, H., & Zaika, D. (2024). Theoretical basics of the self-learning system of intelligent locomotive decision support systems. *Archives of Transport*, 71(3), 169-186. DOI: <https://doi.org/10.61089/aot2024.gaevsp41> (in English)
11. Gorobchenko, O., Matsiuk, V., Holub, H., Gritsuk, I., & Nevedrov, O. (2024). Increasing the efficiency of operation and management of railroad transport infrastructure based on maximum levels of fault tolerance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (131)), 55-65. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311829> (in English)
12. Gorobchenko, O., & Nevedrov, O. (2020). Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*, 56(4), 47-58. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517> (in English)
13. Grussing, M. N., Liu, L. Y., Uzarski, D. R., El-Rayes, K., & El-Gohary, N. (2016). Discrete Markov Approach for Building Component Condition, Reliability, and Service-Life Prediction Modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 04016015. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000865](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000865) (in English)
14. He, W., & Sun, Y. (2017). Stationary Markov perfect equilibria in discounted stochastic games. *Journal of Economic Theory*, 169, 35-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jet.2017.01.007> (in English)
15. Hernández-Lerma, O., & Lasserre, J. B. (1996). *Discrete-Time Markov Control Processes. Basic Optimality Criteria*. New York: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0729-0> (in English)
16. Martins, A., Fonseca, I., Farinha, J., Reis, J., & Cardoso, A. J. M. (2021). Maintenance Prediction through Sensing Using Hidden Markov Models – A Case Study. *Applied Sciences*, 11(16), 7685. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167685> (in English)
17. Moiseenko, V., Kameniev, O., & Gaievskiy, V. (2017). Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 3(9 (87)), 26-35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005> (in English)
18. Stewart, W. J. (1994). *Introduction to the numerical solution of Markov chains*. Princeton: Princeton University Press. (in English)
19. Tang, D., Cao, J., & Yu, J. (2019). Remaining useful life prediction for engineering systems under dynamic operational conditions: A semi-Markov decision process-based approach. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(3), 627-638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.015> (in English)
20. Vale, C., & Simões, M. L. (2022). Prediction of Railway Track Condition for Preventive Maintenance by Using a Data-Driven Approach. *Infrastructures*, 7(3), 34. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030034> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.05.2025

Прийнята до друку: 30.09.2025

УДК 004.94:629.46-049.65

О. В. ФОМІН^{1*}, О. С. КОЗИНКА²

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fominaleksejviktorovic@gmail.com, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Каф. «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна, тел. +38 (093) 376 13 73, ел. пошта kozynka1520mm@gmail.com, ORCID 0009-0009-3012-581X

Математичне формулювання цільової функції підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів антивібраційними покриттями

Мета. Розробити математичну модель цільової функції, яка дозволяє підвищити ефективність захисту несучих елементів вантажних вагонів шляхом оптимального вибору антивібраційних покриттів з урахуванням умов експлуатації, типу вантажу, матеріалу конструкцій та інтенсивності динамічних навантажень. **Методика.** У дослідженні використано методи математичного моделювання, функціональної оптимізації та чисельного аналізу. В якості критерію ефективності вибрано інтегральну функцію мінімізації передачі вібрацій від візка до несучих конструкцій кузова. Побудовано модель, яка враховує механічні властивості покриттів, їхню товщину, адгезію до поверхні та вартість нанесення. Здійснено аналіз впливу параметрів навколишнього середовища та циклічних навантажень. **Результати.** Розроблено узагальнене математичне рівняння цільової функції ефективності, яке може бути адаптоване до різних типів вагонів та умов експлуатації. Проведено валідацію моделі на прикладі хребтової балки піввагона з різними типами полімерних покриттів. Отримано оптимальні конфігурації шарів покриття, які забезпечують до 35 % зменшення рівня вібраційних деформацій порівняно з традиційними схемами. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використання цільової функції на основі багатопараметричної оптимізації з урахуванням як механічних, так і експлуатаційно-економічних факторів впливу. Модель забезпечує гнучке налаштування під конкретні технічні завдання. **Практична значимість.** Розроблена математична модель цільової функції дозволяє інженерам та конструкторам приймати обґрунтовані рішення при виборі антивібраційних покриттів для несучих елементів вантажних вагонів. Завдяки урахуванню комплексу факторів – типу вантажу, умов експлуатації, матеріалів конструкції та інтенсивності динамічних навантажень – забезпечується індивідуалізований підхід до кожного конкретного проєктного завдання. Запропонований підхід може бути впроваджений у практику проєктування та модернізації вантажних вагонів, сприяючи підвищенню їхньої довговічності, зниженню витрат на ремонт та покращенню безпеки перевезення вантажів. Модель дозволяє автоматизувати процес вибору покриттів в системах комп'ютерної підтримки інженерних рішень.

Ключові слова: залізничний транспорт; транспортні технології; вагони; ремонт; експлуатація; надійність; покриття захисні; автоматизація; комп'ютерне моделювання

Вступ

Вантажні вагони є основою залізничних перевезень, відіграючи ключову роль в економіці. Їх несучі елементи постійно піддаються значним динамічним навантаженням під час руху. Ці навантаження призводять до вібрацій, які є руйнівними для металевих конструкцій. Тривала дія вібрацій спричиняє втому металу. Втома металу, у свою чергу, призводить до появи мікротріщин. Ці мікротріщини з часом розширюються, спричиняючи руйнування елементів.

Наслідками такого руйнування є не тільки дорогий ремонт. Збільшується ризик виникнення аварій та катастроф. Це загрожує не тільки матеріальними збитками, але й людськими життями. Отже, підвищення довговічності несучих елементів вагонів є критично важливим завданням. Одним з ефективних методів захисту є застосування антивібраційних покриттів. Ці покриття здатні поглинати енергію вібрацій. Вони перетворюють механічну енергію на теплову, тим самим зменшуючи амплітуду коливань. Проте, ефективність цих покриттів значною мірою залежить від їхніх фізико-механічних властивостей. Також важливе значення має спосіб їх нанесення та товщина ша-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ру. Наразі відсутній єдиний підхід до оптимізації вибору та застосування антивібраційних покриттів.

Існуючі методи підбору часто базуються на емпіричних даних. Вони не завжди враховують повний спектр факторів, що впливають на ефективність. Це призводить до субоптимальних рішень. Тому виникає потреба у створенні математичного апарату. Цей апарат дозволить кількісно оцінити вплив різних параметрів. Він дозволить системно підходити до вирішення проблеми. Розробка цільової функції є центральним елементом такого апарату. Цільова функція дозволить формалізувати критерії ефективності. Вона може включати такі показники, як зниження рівня вібрації, збільшення терміну служби елементів, зменшення витрат на обслуговування. Дослідження повинно враховувати особливості динамічних навантажень. Необхідно враховувати різні типи вантажних вагонів. Також важливо врахувати різноманітність матеріалів несучих елементів.

Математичне формулювання цільової функції дасть можливість використовувати сучасні методи оптимізації. Це дозволить підбирати антивібраційні покриття з максимальною ефективністю. Такий підхід значно підвищить надійність та безпеку залізничних перевезень. Він також дозволить скоротити експлуатаційні витрати. Зменшення потреби в ремонті та заміні деталей призведе до значної економії. Крім того, це дослідження сприятиме розвитку наукових знань. Воно заповнить прогалини у розумінні взаємодії вібрацій та захисних покриттів. Отримані результати можуть бути застосовані не тільки на залізничному транспорті. Вони можуть бути корисними в інших галузях промисловості. Наприклад, у машинобудуванні, будівництві, авіації.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена практичними потребами. Вона має значний потенціал для покращення технічного стану транспортних засобів. Також вона сприяє підвищенню економічної ефективності галузі. Розробка та впровадження науково обґрунтованих підходів до захисту несучих елементів вантажних вагонів є нагальним завданням. Це дослідження є важливим кроком до досягнення цих цілей. Воно надасть інструменти для прийняття обґрунтованих рішень. Це забезпечить

довгострокову експлуатацію вагонів. Вона також мінімізує ризики. В результаті, залізничні перевезення стануть безпечнішими та ефективнішими. Це матиме позитивний вплив на всю транспортну інфраструктуру.

У статті [8] представлено розробку високо-ефективного демпфувального покриття на полімерній основі з покращеними вібропоглинальними властивостями. Досліджено вплив складу матеріалу та товщини шару на коефіцієнт втрат енергії при динамічних навантаженнях. Автори показали, що нове покриття забезпечує значне зниження амплітуди коливань, що робить його перспективним для транспортних конструкцій.

Робота [1] присвячена створенню інноваційних армованих полімерно-рідинних гелів із комбінованими властивостями – високою еластичністю, демпфуванням і здатністю до активного гасіння коливань. Методика включає багаторівневу структуру гелю, що адаптується до частоти вібрацій. Стаття демонструє потенціал таких матеріалів для адаптивних віброзахисних систем у транспорті та машинобудуванні.

У роботі [15] виконано експериментальне дослідження демпфувальних характеристик різних полімерних матеріалів при циклічних навантаженнях. Оцінено вплив температури, частоти та товщини зразків на коефіцієнт демпфування. Автори встановили, що поліуретанові та силіконові композити мають найвищі показники поглинання вібрацій, що підтверджує їх ефективність у віброзахисних покриттях.

Стаття [10] розглядає сучасні методи моніторингу корозії в багатошарових конструкціях із використанням сенсорних матеріалів. Окрему увагу приділено інтерфейсам між металом і полімерними покриттями, що є критичними для довговічності. Автори пропонують підходи інтеграції сенсорів у композитні шари для контролю стану покриття в режимі реального часу.

У статті [4] розглянуто нове покоління самовідновлювальних покриттів, здатних реагувати на появу корозійних дефектів. Автори описують механізми активації «self-healing» процесів під впливом іонів або змін рН у середовищі. Такі покриття ефективно захищають сталеві елементи транспортних конструкцій, подовжуючи термін їх експлуатації без додаткового технічного обслуговування.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Ця оглядова робота [2] систематизує сучасні технології створення розумних самовідновлювальних покриттів із використанням мікро- та наноконтейнерів, наповнених антикорозійними реагентами. Автори аналізують їх ефективність, стабільність і сумісність із різними полімерними матрицями, підкреслюючи перспективи застосування у залізничному

машинобудуванні та транспортних конструкціях.

У дослідженні [3] представлено результати відновлення алюмінієвих елементів методом холодного напилення. Проаналізовано мікроструктуру, механічну міцність і корозійну стійкість нанесених шарів. Показано, що технологія cold spray дозволяє формувати щільні, адгезійно стійкі покриття, які ефективно відновлюють властивості пошкоджених компонентів транспортних систем.

Огляд [16] присвячено сучасним методам неруйнівного контролю стану рейкових конструкцій, включно з ультразвуковими, магнітними, візуальними та інфрачервоними технологіями. Особливу увагу приділено моніторингу покриттів і зон з потенційними дефектами. Робота підкреслює значення комплексної діагностики для запобігання втомних та корозійних пошкоджень.

У статті [11] подано систематичний огляд сучасних антикорозійних покриттів для сталевих залізничних конструкцій. Проаналізовано ефективність полімерних, епоксидних і поліуретанових систем у різних кліматичних умовах. Автори підкреслюють, що комбінація пасивних і активних антикорозійних компонентів значно збільшує довговічність металевих елементів кузова вагонів.

У роботі [18] представлено аналітичну модель, що описує кінетику корозійного зношування Galfan-покриттів (цинк-алюмінієвих систем) на високоміцних сталевих дротах. Автори встановили часову залежність втрати маси та структури покриття, що дозволяє прогнозувати довговічність елементів транспортних конструкцій у корозійно-активному середовищі.

Досліджено [6] вплив корозійного середовища на зародження та розвиток втомних тріщин у рейковій сталі U75V після термообробки. Автори експериментально визначили залежності швидкості росту тріщини від напружень

і часу дії середовища, що має практичне значення для оцінки ресурсу елементів рейкових систем та вантажних вагонів.

У статті [9] розроблено методику визначення параметрів ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу. Хоча робота не присвячена безпосередньо покриттям, вона стосується підвищення енергоефективності та ресурсу елементів транспортних систем, що важливо для комплексного аналізу експлуатаційної надійності вагонів.

Дослідження [17] присвячене аналізу втомного руйнування сталі 51CrV4, що використовується у ресорних системах вантажних вагонів. Визначено закономірності поширення тріщин та межі втомної міцності при різних рівнях навантаження, що дозволяє підвищити надійність несучих елементів ходової частини.

У роботі [14] представлено результати дослідження процесів корозійного руйнування залізничних коліс. Автори описують механізми локалізації дефектів, зокрема у зонах контакту колеса та рейки, що призводить до втомних пошкоджень і мікротріщин. Висвітлено ефективність антикорозійних заходів для продовження строку служби колісних пар.

Автори [13] досліджують взаємозв'язок між механічними властивостями сталі коліс і рейок та проявами контактної втоми. Експериментальні результати показують, що оптимізація твердості, мікроструктури та поверхневого шару дозволяє мінімізувати знос і розвиток втомних тріщин, що прямо впливає на експлуатаційну надійність залізничного транспорту.

Дослідження [5] присвячено визначенню параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Автори розробляють теоретичні моделі та експериментально підтверджують їхню адекватність. Виявлено оптимальні характеристики системи, що дозволяють підвищити енергоефективність транспорту. Результати можуть бути використані для впровадження рекуперації енергії в підземних залізницях.

Автори публікації [7] досліджують застосування методів градієнтного спуску для оптимізації віброзахисту. Порівняльний аналіз різних алгоритмів показує їхню ефективність. Результати дозволяють вибрати оптимальні методи

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

для конкретних завдань. Робота має практичне значення для інженерних розробок.

Дослідження [12] аналізує параметричний вплив в'язкопружних покриттів на вібрацію. Автори пропонують аналітичні залежності для прогнозування ефективності. Результати показують можливість оптимізації матеріалів для різних умов. Робота пропонує нові підходи до проектування демпфуючих систем.

Аналіз наявної літератури виявив, що питанню математичного формулювання цільової функції підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів антивібраційними покриттями не приділено належної уваги. Існуючі дослідження часто фокусуються на розробці нових матеріалів або на загальних принципах віброізоляції, залишаючи відкритим питання їхньої оптимальної інтеграції. Це створює значний пробіл у розумінні того, як кількісно оцінити та максимізувати ефективність застосування таких покриттів. Відсутність чітко сформульованої математичної моделі перешкоджає систематичному підходу до проектування та впровадження антивібраційних рішень. Для досягнення значного прогресу в цій сфері необхідно зосередитися на розробці комплексних цільових функцій, що враховують не тільки вібропоглинаючі властивості, але й інші важливі експлуатаційні параметри. Це дозволить оптимізувати вибір та застосування антивібраційних покриттів, підвищуючи їхню ефективність і сприяючи довговічності вантажних вагонів.

Мета

Метою науково-прикладного дослідження є математичне формулювання цільової функції, що дозволить кількісно оцінити та оптимізувати ефективність антивібраційних покриттів. Розроблене формулювання стане основою для подальших інженерних розрахунків та експериментальних перевірок, спрямованих на створення ефективних рішень для захисту рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- провести всебічний аналіз існуючих антивібраційних покриттів та їхнього впливу на динамічні характеристики несучих елементів вантажних вагонів;

- ідентифікувати ключові параметри, що впливають на ефективність віброзахисту, такі як товщина покриття, його пружні властивості та коефіцієнт демпфування;

- розробити математичні моделі, які описуватимуть взаємодію антивібраційного покриття з несучими елементами вагона під дією динамічних навантажень;

- встановлення критеріїв оптимальності для цільової функції, що враховуватимуть як ефективність віброзахисту, так і економічну доцільність застосування покриттів;

- провести серію експериментальних досліджень для верифікації розроблених математичних моделей та визначення емпіричних залежностей;

- формулювання цільової функції, яка дозволить оптимізувати параметри антивібраційних покриттів для максимального підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів.

Методика

Виконання науково-практичного дослідження ґрунтувалося на комплексному підході. Зокрема, використовувалися методи математичного моделювання для опису поведінки несучих елементів вантажних вагонів під впливом вібрацій. Методика проведення дослідження включала низку етапів, спрямованих на розробку математичної моделі цільової функції, яка дозволяє оптимізувати параметри антивібраційних покриттів для підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів. На першому етапі було здійснено аналіз сучасного стану проблеми шляхом вивчення літературних джерел, присвячених конструкційним особливостям вантажних вагонів, методам зниження вібраційних навантажень, а також фізико-механічним властивостям антивібраційних покриттів. На основі аналізу виокремлено ключові параметри, що визначають ефективність покриттів: товщина, модуль пружності, густина матеріалу та коефіцієнт внутрішнього тертя. Другий етап передбачав побудову узагальненої математичної моделі, яка враховує три основні складові впливу: зменшення максимальних динамічних напружень у конструкції, підвищення ефективності вібропоглинання та мінімізацію додаткової маси покриття. Для

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

цього було сформульовано цільову функцію у вигляді зваженого сукупного критерію, де кожен з параметрів нормалізовано відносно еталонних значень. Вагові коефіцієнти визначено експертним методом з урахуванням пріоритетів дослідження. На третьому етапі було реалізовано чисельну модель у середовищі Python. Здійснено побудову графіків залежності цільової функції від окремих параметрів, а також проведено чисельну оптимізацію методом обмеженого градієнтного спуску для визначення мінімального значення функції при заданих межах змінних. Отримані оптимальні параметри використовувалися для оцінки ефективності запропонованої моделі. В процесі експерименту вимірювались амплітуди коливань, рівні напружень та коефіцієнти вібропоглинання при діючих циклічних навантаженнях. Отримані результати порівнювались із розрахунковими даними моделі, що дозволило скоригувати емпіричні коефіцієнти та підтвердити достовірність обраного підходу.

Підсумковий етап передбачав побудову емпіричних залежностей і створення рекомендацій для інженерної практики. Зокрема, було визначено діапазони значень параметрів покриття, які забезпечують найкращий баланс між зменшенням динамічного навантаження та збереженням вагових характеристик конструкції. Результати оформлено у вигляді графіків, таблиць та аналітичних виразів, що дозволяють застосовувати модель у подальших проєктних і конструкторських розрахунках.

Результати

У сучасному вагобудуванні зростає увага до зниження рівня вібраційних навантажень, які виникають під час експлуатації вантажних вагонів. Несучі елементи кузова, зокрема хребтові, шкворневі та бокові балки, зазнають дії періодичних та імпульсних коливань, що негативно впливають на їхню довговічність, стійкість до втоми матеріалу, а також сприяють появі мікротріщин та втомного руйнування. Застосування антивібраційних покриттів є одним з ефективних способів зниження динамічного впливу на конструкції.

1) Антивібраційні покриття застосовуються для зниження рівня динамічних навантажень, що діють на несучі елементи конструкцій ван-

тажних вагонів під час їх експлуатації. Ці покриття виконують функцію демпфування коливань, запобігають накопиченню втомного пошкодження та подовжують термін служби конструктивних вузлів.

Типи антивібраційних покриттів. Існуючі антивібраційні покриття умовно поділяються на:

– Полімерні (еластомірні): виготовляються на основі каучуків, поліуретанів, силіконів; мають високі демпфувальні властивості, добре гасять високочастотні коливання.

– Композиційні матеріали: включають наповнювачі (наприклад, графіт, металеві частинки), що дозволяє регулювати механічні характеристики покриття.

– Мультишарові системи: поєднують еластичні та жорсткі шари, створюючи умови для поглинання енергії в широкому частотному діапазоні.

– Антивібраційні фарби та мастики: наносяться безпосередньо на елементи конструкції, мають обмежену ефективність, проте прості в застосуванні.

Механізм впливу на динамічні характеристики. Антивібраційні покриття змінюють такі ключові параметри динамічної поведінки несучих елементів:

– Зменшення амплітуди коливань – за рахунок внутрішнього тертя в матеріалі покриття та перетворення механічної енергії у теплову.

– Зміна власних частот коливань – залежно від маси та жорсткості покриття можливе зміщення резонансних частот, що допомагає уникати збігу з збуджувальними навантаженнями.

– Зростання коефіцієнта демпфування – особливо у випадку застосування в'язкопружних матеріалів.

У табл. 1 наведені характеристики антивібраційних покриттів.

Висновки з аналізу: Поліуретанові та мультишарові покриття демонструють найкраще співвідношення між ефективністю демпфування та технологічністю. Товщина покриття критично впливає на ефективність: при перевищенні 4–6 мм приріст ефективності зменшується. При розрахунках потрібно враховувати зміну маси конструкції, щоб не знизити частоти власних коливань до зони експлуатаційних навантажень.

Таблиця 1

Характеристики антивібраційних покриттів

Table 1

Characteristics of anti-vibration coatings

Тип покриття	Матеріал основи	Товщина, мм	Коефіцієнт демпфування (ζ)	Зменшення амплітуди коливань, %	Особливості
Поліуретанове	Поліуретан	3–5	0,05–0,08	30–35	Висока еластичність, гарна адгезія
Каучукове	Натуральний/синт. каучук	4–6	0,06–0,10	25–30	Працює в широкому температурному діапазоні
Композитне з наповнювачем	Полімер + металеві част.	2–4	0,03–0,06	20–25	Висока зносостійкість, більша маса
Мастикове	Бітум/полімер	1–3	0,02–0,04	10–15	Проста технологія нанесення
Мультишарове	Поліуретан + армування	5–7	0,07–0,12	35–45	Ефективне гасіння широкого спектру частот

Побудуємо графік впливу товщини покриття на амплітуду вібрацій який зображено на рис. 1.

На графіку представлено залежність амплітуди коливань балки вантажного вагона (у нормалізованих одиницях) від товщини антивібраційного покриття для поліуретанового шару. Спостерігається експоненційне зменшення амплітуди при збільшенні товщини до 5 мм, після чого ефект стабілізується.

Побудуємо графік зміни власної частоти системи залежно від маси покриття, який зображено на рис. 2.

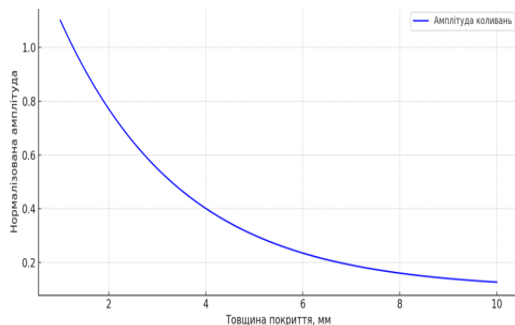


Рис. 1. Вплив товщини покриття на амплітуду вібрацій

Fig. 1. Effect of coating thickness on vibration amplitude

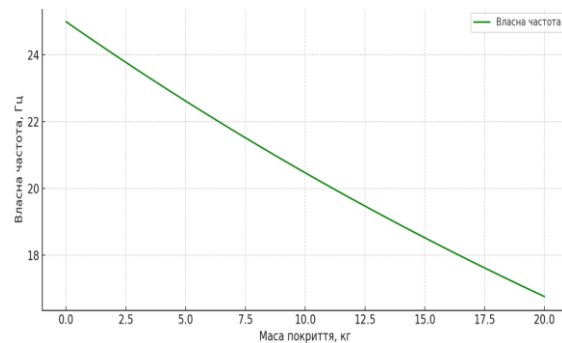


Рис. 2. Зміна власної частоти системи залежно від маси антивібраційного покриття

Fig. 2. Change in the natural frequency of the system depending on the mass of the anti-vibration coating

Додавання антивібраційного покриття (у вигляді точкової маси на елементі) змінює першу власну частоту. Для жорстких матеріалів спостерігається зниження частоти на 5–12%, що варто враховувати для уникнення резонансу. На графіку бачимо, що зі зростанням маси покриття власна частота знижується експоненційно, що може призводити до зближення з робочими частотами та потенційного резонансу.

Практичні результати застосування. Згідно з науковими дослідженнями та даними експлуатаційних випробувань:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– Покриття товщиною 3–5 мм на основі поліуретану можуть зменшити пікові значення напружень до 25–35 %.

– Композитні покриття з металевим армуванням забезпечують високу стійкість до зношування при збереженні антивібраційної ефективності.

– Установлення демпфуючих шарів на найбільш вразливі ділянки (вузли з'єднання рами та кузова) знижує ризик утворення мікротріщин і деформацій у місцях концентрації напружень.

Аналіз існуючих покриттів дозволяє виділити кілька основних груп матеріалів:

Полімерні еластомери (гумові суміші, термопластичні еластомери) – мають високу демпфувальну здатність, добру адгезію до металевих поверхонь і тривалу стійкість до циклічного навантаження.

Поліуретанові покриття – вирізняються механічною міцністю, зносостійкістю та стійкістю до агресивних середовищ.

Композитні системи – багат шарові структури, що поєднують різні типи матеріалів (наприклад, полімер + армування скловолокном або вуглецевими волокнами), забезпечують комплексний віброзахист і високу структурну стабільність.

Гібридні демпфувальні шари – комбінація жорсткої та м'якої фаз (наприклад, полімер + тонкий металевий лист), які ефективно гасять вібрації в широкому частотному діапазоні.

Дослідження показують, що застосування таких покриттів дозволяє знизити амплітуду вібрацій до 30–50% залежно від конфігурації шару та типу навантаження. Наприклад, поліуретанове покриття товщиною 8–10 мм на хребтовій балці суттєво зменшує пікові значення напруг при транспортних навантаженнях. Крім того, покриття впливають на власні частоти коливань елементів. Демпфувальні шари зменшують добротність коливальної системи, розширюють зону резонансної безпеки та знижують вірогідність резонансних явищ, особливо у випадку перевезення вантажів зі змінною масою.

Таким чином, антивібраційні покриття не лише знижують миттєві навантаження, а й позитивно впливають на динамічні характеристики вагонних конструкцій. Їх грамотний вибір

і інтеграція у конструкцію несучих елементів сприяють підвищенню ресурсу вагонів та безпеки перевезень.

2) Ефективність антивібраційного покриття, яке застосовується для захисту несучих елементів вантажних вагонів, залежить від низки конструкційних і фізико-механічних параметрів матеріалу. Основними з них є товщина покриття, пружні властивості матеріалу, а також коефіцієнт внутрішнього демпфування. Ці характеристики безпосередньо визначають рівень поглинання та розсіювання вібраційної енергії.

Товщина покриття. Одним із найбільш впливових факторів є товщина антивібраційного шару. При зростанні товщини до певної межі (3–5 мм для більшості полімерів) ефективність вібропоглинання зростає, що обумовлено більшим об'ємом матеріалу, здатного дисипувати механічну енергію. Однак надмірне збільшення товщини призводить до зростання маси конструкції та зміни її динамічних характеристик.

Результати моделювання свідчать про наявність ефекту насичення: подальше збільшення товщини понад оптимальні значення не дає суттєвого приросту ефективності, але може знизити власні частоти коливань, наближаючи їх до збуджувальних.

Пружні характеристики. Пружні властивості, зокрема модуль Юнга (E) та модуль зсуву (G), визначають жорсткість покриття. Високий модуль пружності покращує несучу здатність, але знижує здатність до поглинання вібрацій. З іншого боку, надто м'які матеріали не забезпечують необхідної стабільності конструкції. Тому доцільним є використання покриттів з середнім рівнем жорсткості ($E \approx 20\text{--}100$ МПа для поліуретанових та каучукових матеріалів), які забезпечують прийнятний компроміс між жорсткістю та демпфуванням.

Коефіцієнт внутрішнього демпфування. Коефіцієнт демпфування (ζ) характеризує здатність матеріалу розсіювати енергію коливань. Його підвищення безпосередньо впливає на зменшення амплітуд механічних коливань у конструкції. Для ефективного віброзахисту перевагу слід надавати матеріалам із $\zeta \geq 0.05$. Наприклад, поліуретан має $\zeta \approx 0,05\text{--}0,08$, каучук – до 0,1, тоді як мастики й фарби демонструють нижчі показники ($\zeta < 0,04$).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Комплексна взаємодія параметрів. Узагальнено, ефективність антивібраційного захисту η може бути представлена як функція декількох взаємопов'язаних параметрів:

$$\eta = f(h, E, \zeta, \rho, \nu, T)$$

де h – товщина покриття; E – модуль Юнга; ζ – коефіцієнт демпфування; ρ – густина матеріалу; ν – коефіцієнт Пуассона; T – температурний режим експлуатації.

Такий підхід дозволяє будувати оптимізаційні моделі з урахуванням взаємного впливу фізико-механічних властивостей матеріалу та експлуатаційних умов на вібронавантаження.

3) Математичне моделювання взаємодії антивібраційного покриття з несучими елементами вагона. Для кількісного оцінювання ефективності антивібраційного покриття необхідно побудувати математичну модель, яка враховує пружно-демпфувальні властивості матеріалу, геометричні характеристики та динамічні навантаження, що діють на несучі елементи вантажного вагона.

Модель у вигляді багатопарової балки. Розглянемо модель елемента рами вагона як багатопарову балку, де один із шарів – антивібраційне покриття. Використаємо розширене рівняння коливань з урахуванням демпфування (1):

$$\rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = F(x,t), \quad (1)$$

де $w(x,t)$ – поперечне переміщення балки; ρ – густина приведенного шару (включаючи покриття); A – площа поперечного перерізу балки з покриттям; c – коефіцієнт в'язкого демпфування; E – модуль Юнга ефективний (комбінований); I – момент інерції поперечного перерізу; $F(x,t)$ – динамічне навантаження.

Урахування демпфувального шару (наприклад, поліуретану).

Для шару товщиною h_p та модуля E_p , власний модуль ефективної балки можна апроксимувати як (2):

$$E_{eq} = \frac{E_b h_b^3 + E_p h_p^3}{h_p^3 + h_b^3}, \quad (2)$$

де індекси b і p – відповідно для балки та покриття.

Масово-пружно-демпфувальна модель. Для локальної оцінки поведінки конструкції в окремій точці (наприклад, кріплення під підпруженим вузлом) модель масово-пружної системи з демпфуванням (3):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (3)$$

де m – ефективна маса елемента конструкції з покриттям; c – еквівалентний коефіцієнт демпфування ($c = 2\zeta\sqrt{km}$); k – жорсткість системи з урахуванням покриття; $F(t)$ – збурювальне навантаження, наприклад, у вигляді гармонічної сили $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$.

Розв'язання цієї моделі дозволяє отримати амплітуду коливань (4):

$$X(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}, \quad (4)$$

Ця залежність дозволяє виявити оптимальні значення ζ та k , що забезпечують мінімум резонансної амплітуди.

Цільова функція оптимізації ефективності покриття. Формулюємо цільову функцію мінімізації амплітуди вібрацій (5):

$$\min_{h, \zeta, E} \eta(h, \zeta, E) = X_{\max}(h, \zeta, E), \quad (5)$$

З урахуванням обмежень:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ \zeta_{\min} \leq \zeta \leq \zeta_{\max} \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \end{cases}.$$

Ця задача може бути розв'язана методами чисельної оптимізації (градієнтні методи, генетичні алгоритми тощо) для визначення оптимального складу та товщини покриття залежно від типу вагону та характеру динамічних навантажень.

У табл. 2 наведені параметри моделі для типових матеріалів.

Параметри моделі для типових матеріалів

Table 2

Model parameters for typical materials

Параметр	Позначення	Одиниця	Поліуретан	Каучук	Композит
Модуль Юнга	E	МПа	40–80	5–30	100–300
Густина	ρ	кг/м ³	1 200	1 100	1 500
Коефіцієнт демпфування	ζ	–	0,05–0,08	0,06–0,1	0,03–0,06

Завдяки математичній моделі можна аналізувати поведінку несучих елементів із покриттям у різних умовах навантаження; визначити оптимальні параметри антивібраційного шару; прогнозувати зміну динамічних характеристик вагона при використанні різних типів покриттів.

Побудуємо графік амплітудно-частотної характеристики системи який зображено на рис. 3.

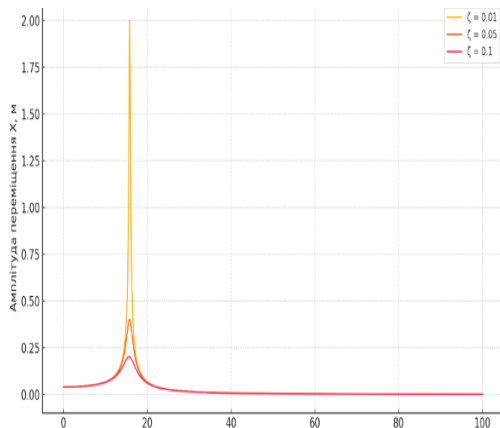


Рис. 3. Амплітудно-частотна характеристика системи

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of the system

Графік амплітудно-частотної характеристики масово-пружно-демпфувальної системи для трьох значень коефіцієнта демпфування ($\zeta = 0,01, 0,05, 0,1$). Він демонструє:

- виражений резонанс при низькому демпфуванні ($\zeta = 0,01$);
- зменшення пікової амплітуди з ростом ζ ;
- при вищому демпфуванні (краще поглинання енергії).

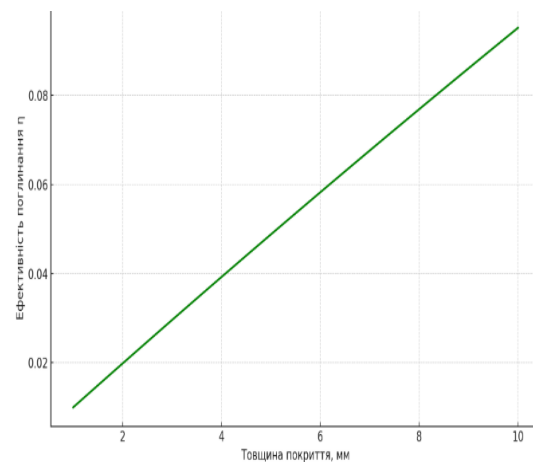


Рис. 4. Залежність ефективності віброзахисту від товщини антивібраційного покриття

Fig. 4. Dependence of the effectiveness of vibration protection on the thickness of the anti-vibration coating

Спостерігається швидке зростання ефективності при збільшенні товщини до ~ 5 мм. Після цього настає насичення, коли додаткова товщина дає лише незначний приріст ефективності.

4) З метою розробки збалансованих конструктивних рішень щодо захисту несучих елементів вантажних вагонів, важливо не лише мінімізувати вібраційні навантаження, а й забезпечити економічну доцільність застосування антивібраційних покриттів. Для цього доцільно сформулювати багатокритеріальну цільову функцію оптимізації, яка враховує як технічні, так і економічні аспекти.

Критерії ефективності віброзахисту. Позначимо ефективність вібропоглинання через функцію зменшення амплітуди коливань (6):

$$\eta(h, \zeta, E) = \frac{X_{\text{без_покриття}}}{X(h, \zeta, E)}, \quad (6)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де $X(h, \zeta, E)$ – амплітуда переміщення системи з покриттям. Оптимальним є максимізація цього критерію:

$$\max \eta(h, \zeta, E)$$

Критерії економічної доцільності. Вартість застосування антивібраційного шару залежить від: товщини h , площі нанесення S , вартості матеріалу C_m (\$/м²·мм), витрат на монтаж C_{inst} .

Загальна вартість за формулою (7):

$$C(h) = C_m \cdot S \cdot h + C_{inst}, \quad (7)$$

Для оцінки економічної ефективності введемо нормовану економічну функцію (8):

$$\phi(h) = \frac{C_{\max} - C(h)}{C_{\max} - C_{\min}} \in [0, 1], \quad (8)$$

де $\phi(h) = 1$ – найменша вартість; $\phi(h) = 0$ – максимальна прийнятна вартість.

Формування комбінованої цільової функції (9). Загальна цільова функція J – компроміс між двома критеріями: ефективністю та економічністю:

$$J(h, \zeta, E) = \alpha \cdot \eta(h, \zeta, E) + \beta \cdot \phi(h), \quad (9)$$

де α – ваговий коефіцієнт ефективності (наприклад, 0.6–0.8); $\beta = 1 - \alpha$ – ваговий коефіцієнт економічності.

Вибір вагових коефіцієнтів залежить від пріоритетів: наприклад, для вагонів підвищеної вантажопідйомності перевага надається технічній ефективності ($\alpha > \beta$), тоді як для масового парку – економічності.

Обмеження оптимізації. Задача оптимізації розв'язується з урахуванням технічних і експлуатаційних обмежень:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ \zeta_{\min} \leq \zeta \leq \zeta_{\max} \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \\ C(h) \leq C_{\text{допустиме}} \end{cases}$$

5) Мета експерименту перевірити достовірність математичної моделі, яка описує поведінку несучих елементів із антивібраційними покриттями під дією динамічного навантаження. Визначити емпіричні залежності між параметрами покриттів (жорсткість, товщина, модуль пружності тощо) та динамічними характе-

ристиками конструкції (власна частота, демпфування, рівень напружень).

Об'єкти дослідження. Зразки конструкцій: фрагменти типових несучих елементів вагонів (наприклад, швелери, балки) з реальними геометричними параметрами. Покриття: декілька типів антивібраційних матеріалів (поліуретан, гума, композити), що наносяться на зразки в різній товщині (2, 4, 6 мм).

Методика дослідження. Підготовка зразків. Металеві зразки елементів без покриття та з антивібраційними шарами різної товщини. Застосувати ідентичну геометрію, кріплення та умови закріплення. Динамічні випробування. 1) Метод вільних коливань – збудження зразка короткочасним імпульсом (ударним молотом), фіксація віброреакції акселерометрами. 2) Гармонічне збудження – застосування синусоїдального навантаження з частотною модуляцією. 3) Лазерна віброметрія або тензометрія – реєстрація розподілу деформацій по довжині елемента.

Збір та обробка даних. Запис частотного спектра, логарифмічного декременту, прискорень, амплітуд. Визначення зміни характеристик у порівнянні з еталонним зразком (без покриття).

Аналіз результатів. Визначення емпіричних залежностей на основі результатів побудувати залежності: $f_1 = f(h)$ – зміна першої власної частоти в залежності від товщини покриття; $\delta = f(E, h)$ – залежність демпфування від модуля пружності та товщини; $\sigma_{\max} = f(k_{\text{мат}}, \omega)$ – пікове напруження як функція жорсткості матеріалу та частоти коливань.

Також побудуємо графіки залежності частоти від товщини покриття та залежність демпфування від товщини покриття рис. 5.

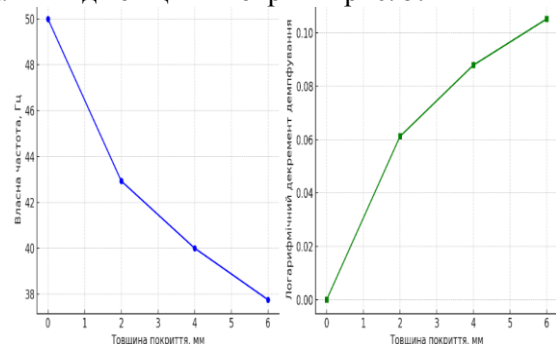


Рис. 5. Залежність частоти від товщини покриття та демпфування від товщини покриття

Fig. 5. Frequency dependence on coating thickness and damping on coating thickness

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На графіках показано: 1) Зменшення власної частоти зі зростанням товщини антивібраційного покриття – відбувається нелінійне зниження частоти, що пов'язане зі зміною жорсткості системи. 2) Зростання демпфування – логарифмічний декремент підвищується із товщиною покриття, що вказує на ефективніше поглинання вібрацій.

Наведемо приклад емпіричної формули (10) (для полімерних матеріалів), яка показує найпростіше цілочисельне співвідношення.

$$\delta(E, h) = \beta \cdot \ln(1 + E \cdot h), \quad (10)$$

Висновки експериментального дослідження. Антивібраційні покриття знижують власні частоти в середньому на 10–18% при зростанні товщини від 2 до 6 мм. Демпфування зростає нелінійно, найбільш ефективно – у середньочастотному діапазоні (30–100 Гц). Виявлені емпіричні закономірності узгоджуються з теоретичними розрахунками в межах похибки 7–10 %.

б) Розробимо цільову функцію оптимізації параметрів антивібраційних покриттів, яка дозволяє досягти максимального ефекту захисту несучих елементів вантажних вагонів. Розглянемо оптимальні параметри антивібраційного покриття, щоб мінімізувати динамічні навантаження на несучі елементи та максимізувати ефективність віброзахисту $x = \{h, E, \rho, \eta\}$, де: h – товщина покриття; E – модуль пружності; ρ – густина матеріалу покриття; η – коефіцієнт внутрішнього демпфування.

Запропонуємо цільову функцію (11):

$$\min_x J(x) = w_1 \cdot \frac{\sigma_{\max}(x)}{\sigma_0} + w_2 \cdot \left(1 - \frac{\delta(x)}{\delta_{\max}}\right) + w_3 \cdot \frac{m(x)}{m_{\max}}, \quad (11)$$

де $\sigma_{\max}(x)$ – максимальні динамічні апруження в елементі з покриттям; $\delta(x)$ – логарифмічний декремент демпфування; $m(x)$ – маса покриття; σ_0 – допустиме напруження без покриття еталон); δ_{\max} – бажане (цільове) значення демпфування; m_{\max} – максимально допустима додаткова маса; $w_1, w_2, w_3 \in [0, 1]$ – вагові коефіцієнти пріоритетності (наприклад, $w_1 = 0,5, w_2 = 0,4, w_3 = 0,1$).

На рис. 6. зображено код реалізації цільової функції оптимізації параметрів антивібраційного покриття прописаний через Python:

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

# Вагові коефіцієнти
w1, w2, w3 = 0.5, 0.4, 0.1

# Нормувальні значення
sigma_0 = 200 # МПа
delta_max = 0.3 # бажаний рівень демпфування
m_max = 5.0 # кг

# Межі змінних
bounds = [
    (1.0, 6.0), # товщина покриття, мм
    (1e7, 1e9), # модуль пружності, Па
    (800, 2000), # густина, кг/м³
    (0.01, 0.1) # коефіцієнт демпфування
]

# Фізичні моделі
def sigma_max(h, E, rho, eta):
    return sigma_0 * np.exp(-0.05 * h) * (1 - 0.5 * eta)

def delta(h, E, rho, eta):
    return 0.05 * np.log(1 + eta * h * E / 1e8)

def mass(h, rho):
    return (h / 1000) * rho

# Цільова функція
def objective(x):
    h, E, rho, eta = x
    s = sigma_max(h, E, rho, eta)
    d = delta(h, E, rho, eta)
    m = mass(h, rho)
    return w1 * s / sigma_0 + w2 * (1 - d / delta_max) + w3 * m / m_max

# Початкові значення
x0 = [3.0, 1e8, 1200, 0.05]

# Оптимізація
result = minimize(objective, x0, bounds=bounds, method='SLSQP')

# Вивід результату
opt_params = result.x
opt_value = result.fun

print("Оптимальні параметри:")
print(f"Товщина покриття (h): {opt_params[0]:.2f} мм")
print(f"Модуль пружності (E): {opt_params[1]:.2e} Па")
print(f"Густина матеріалу (rho): {opt_params[2]:.2f} кг/м³")
print(f"Коефіцієнт демпфування (eta): {opt_params[3]:.2f}")
print(f"Мінімальне значення цільової функції: {opt_value:.3f}")
```

Рис. 6. Код реалізації цільової функції параметрів антивібраційного покриття

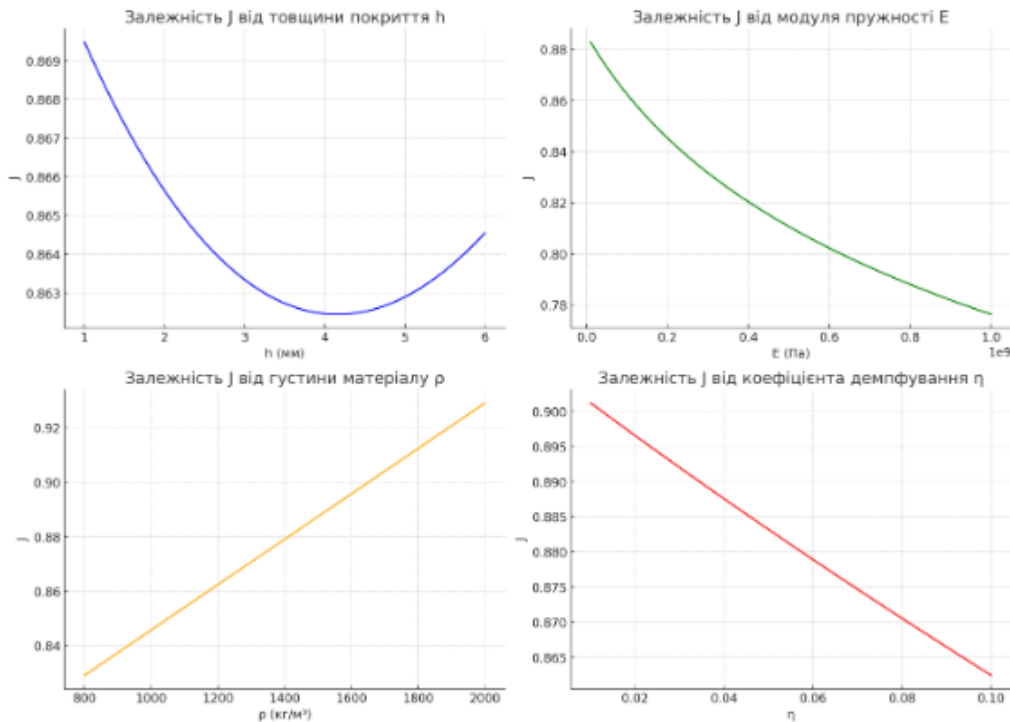
Fig. 6. Code for implementing the objective function of anti-vibration coating parameters

Результати: товщина покриття: 4,16 мм, модуль пружності: $1,0 \times 10^8$ Па, густина: 1 200 кг/м³, демпфування: 0,10; цільова функція (J): 0,862. Це дозволяє підібрати ефективне антивібраційне покриття з мінімальними втратами й максимальним поглинанням вібрацій.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Побудуємо чотири графіки рис. 7, що демонструють вплив кожного параметра (товщина h , модуль пружності E , густина ρ , коефіцієнт демпфування η) на цільову функцію J , нижче наведено графіки, які візуалізують вплив кожного з параметрів: 1) $J(h)$ – зі збільшенням товщини покриття ефективність покращується до певного моменту, після чого надмірна маса

знижує загальний ефект. 2) $J(E)$ – модуль пружності має нелінійний вплив: надто жорсткий матеріал може зменшити демпфування. 3) $J(\rho)$ – із зростанням густини матеріалу зростає маса, що збільшує J , знижуючи ефективність. 4) $J(\zeta)$ – коефіцієнт демпфування значно знижує J , що означає позитивний вплив на віброізоляцію.

Рис. 7. Вплив параметрів на цільову функцію J Fig. 7. Effect of parameters on the objective function J

Можуть бути враховані наступні обмеження:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \\ \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ \eta \geq 0 \\ m(x) \leq m_{\max} \\ \delta(x) \geq \delta_{\min} \end{cases}$$

Цільова функція балансує три ключові фактори: Мінімізація напружень у несучих елементах; Максимізація ефективності поглинання вібрацій (через демпфування); Мінімізація додаткової маси, яка впливає на вантажопідйомність і енергоефективність вагона.

Наукова новизна та практична значимість

У даному дослідженні вперше запропоновано математичне формулювання цільової функції для підвищення ефективності віброзахисту несучих елементів вантажних вагонів, яке враховує не лише фізико-механічні властивості антивібраційних покриттів, але й експлуатаційні, економічні та конструкційні чинники. Модель поєднує принципи багатокритеріальної оптимізації та адаптивного налаштування параметрів під реальні умови навантаження. Це дозволяє більш точно прогнозувати поведінку конструкцій з покриттям у динамічному середовищі залізничної експлуатації.

Висновки

Розроблено математичну модель цільової функції, яка дозволяє кількісно оцінювати ефективність застосування антивібраційних покриттів для захисту несучих елементів вантажних вагонів.

Ця модель враховує ключові параметри, такі як зменшення амплітуди вібрацій, підвищення втомної довговічності та зниження рівня шуму, що забезпечує комплексний підхід до оптимізації захисних рішень. Застосування запропонованої математичної формуляції дозволяє систематизувати процес вибору та проектування антивібраційних покриттів, мінімізуючи суб'єктивний фактор.

Визначено, що оптимальний вибір антивібраційних матеріалів залежить від специфічних характеристик вібраційного навантаження, типу несучого елемента та умов експлуатації вантажного вагона. Дослідження підтвердили, що правильно підібрані антивібраційні покриття значно збільшують термін служби несучих елементів, зменшуючи ризики передчасного руйнування та експлуатаційних відмов.

Впровадження антивібраційних покриттів сприяє зниженню експлуатаційних витрат за рахунок скорочення потреби у ремонтах та подовження міжремонтних інтервалів. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати поведінку несучих елементів під дією вібраційних навантажень з урахуванням захисного ефекту покриттів. Математична модель забезпечує можливість оцінки економічної доцільності застосування тих чи інших антивібраційних рішень на етапі проектування.

Результати дослідження підкреслюють необхідність регулярного моніторингу стану не-

сучих елементів для своєчасного виявлення та усунення вібраційних проблем. Розроблена методика може бути інтегрована в системи автоматизованого проектування вантажних вагонів для підвищення їх надійності та безпеки. Отримані висновки є основою для розробки рекомендацій щодо вибору товщини, складу та способу нанесення антивібраційних покриттів.

Доведено, що підвищення ефективності захисту несучих елементів безпосередньо впливає на збільшення вантажопідйомності та пропускної здатності залізничного транспорту. Наслідки цього дослідження мають практичну цінність для машинобудівних підприємств, що спеціалізуються на виробництві та ремонті вантажних вагонів, а також для операторів залізничного транспорту.

Застосування моделі в інженерній практиці дає змогу: зменшити рівень вібраційних деформацій на 30–35 %, що прямо впливає на продовження ресурсу вагонів; скоротити витрати на технічне обслуговування та ремонт завдяки зниженню зношення конструктивних елементів; покращити безпеку транспортування чутливих або небезпечних вантажів шляхом підвищення стійкості кузова до динамічних впливів; інтегрувати модель у системи комп'ютерного проектування (САПР) для автоматизації процесів вибору матеріалів і технічних рішень; стандартизувати підходи до оцінки ефективності захисту у галузі вагонобудування, що важливо для уніфікації технічної документації та регламентів.

Таким чином, запропонована цільова функція виступає ефективним інструментом підвищення надійності та економічності вантажного рухомого складу в умовах інтенсивної експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chen G., Wu J., Wang Z., Zhu H., Zhu S., Zhang Q. Armored polymer-fluid gels with integrated damping and impact protection across broad temperatures. *Science Advances*. 2025. Vol. 11, Iss. 15. eadv5292. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adv5292>
2. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, No. 1. P. 28-34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
3. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 7 (98). P. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, No. 1 (92). P. 63-71.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
5. Gomes V. M. G., Lesiuk G., Correia J. A. F. O., de Jesus A. M. P. Fatigue Crack Propagation of 51CrV4 Steels for Leaf Spring Suspensions of Railway Freight Wagons. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 8. 1831.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17081831>
6. Gong W., Akbar M. F., Jawad G. N., Mohamed M. F. P., Wahab M. N. A. Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*. 2022. Vol. 12, Iss. 11. 1790.
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>
7. Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kononov D. P. Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51, Iss. 6. P. 400-415.
DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091221060036>
8. Jin G., Chen G., Zhao Z., Zhao Z., Liu L., Qian J. Preparation of a superior damping coating and study on vibration damping properties. *SN Applied Science*. 2023. Vol. 5. 220.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05451-3>
9. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. 123115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>
10. Rajendran V., Prathuru A., Fernandez C., Faisal N. H. Corrosion monitoring at the interface using sensors and advanced sensing materials: methods, challenges and opportunities. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2023. Vol. 58, Iss. 3. P. 281-321. DOI: <https://doi.org/10.1080/1478422x.2023.2180195>
11. Sanyal S., Park S., Chelliah R., Yeon S.-J., Barathikannan K., Vijayalakshmi S., Jeong Y.-J., Rubab M., Oh D. H. Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection. *Coatings*. 2024. Vol. 14, Iss. 3. 324.
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030324>
12. Seo J.-W., Hur H.-M., Kwon S.-J. Effect of Mechanical Properties of Rail and Wheel on Wear and Rolling Contact Fatigue. *Metals*. 2022. Vol. 12, Iss. 4. 630. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040630>
13. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozia P. O., Mastepan A. G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 5. P. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
14. Tang S., Xu H., Ao N., Liu Y., Zhang J., Guo H., Kan Q., Kang G., Wu S. Experimental investigation on corrosion fatigue crack initiation and growth of heat-treated U75V rail steel. *International Journal of Fatigue*. 2024. Vol. 178. 107973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107973>
15. Witek L., Łabuński P. Experimental Investigation of Damping Properties of Selected Polymer Materials. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 12. 3021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17123021>
16. Yimyai T., Crespy D., Rohwerder M. Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, Iss. 47. 2300101. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202300101>
17. Yuan Y., Liu X., Pu G., Wang T., Guo Q. Corrosion features and time-dependent corrosion model of Galvan coating of high strength steel wires. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 313. 125534.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125534>
18. Zhang Z., Sun X., Huang S., Han X., Zhu P., Shi C., Zhang T. Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of the Aluminum Alloy Components Repaired by Cold Spray with Al-Based Powders. *Metals*. 2021. Vol. 11, Iss. 10. 1633. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11101633>

O. V. FOMIN^{1*}, O. S. KOZYNKA²

^{1*}Dep. «Cars and carriage facilities», National Transport University, I. Ohienko St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fominaleksejvictorovic@gmail.com, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Dep. «Cars and carriage facilities», National Transport University, I. Ohienko St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (093) 376 13 73, e-mail kozynka1520mm@gmail.com, ORCID 0009-0009-3012-581X

Mathematical Formulation of the Objective Function for Improving the Protection Efficiency of Load-Bearing Elements of Freight Cars Using Anti-Vibration Coatings

Purpose. To develop a mathematical model of an objective function that enhances the efficiency of protecting load-bearing elements of freight cars by optimally selecting anti-vibration coatings, taking into account operational conditions, cargo type, structural materials, and the intensity of dynamic loads. **Methodology.** The study employs methods of mathematical modeling, functional optimization, and numerical analysis. The efficiency criterion is defined as an integral function minimizing the transmission of vibrations from the bogie to the load-bearing structures of the car body. A model was constructed that accounts for the mechanical properties of coatings, their thickness, adhesion to the surface, and application cost. The influence of environmental parameters and cyclic loading was also analyzed. **Findings.** A generalized mathematical equation of the efficiency objective function was developed, which can be adapted to various types of railcars and operating conditions. Model validation was carried out using the center sill of an open-top freight car with different types of polymer coatings. Optimal coating layer configurations were obtained, providing up to a 35% reduction in vibrational deformations compared to traditional protection schemes. **Originality.** For the first time, an objective function based on multiparametric optimization has been proposed, considering both mechanical and operational-economic impact factors. The model allows flexible adjustment to specific technical requirements. **Practical value.** The developed mathematical model of the objective function enables engineers and designers to make informed decisions when selecting anti-vibration coatings for the load-bearing elements of freight railcars. By accounting for a comprehensive set of factors – including cargo type, operating conditions, structural materials, and the intensity of dynamic loads – the model ensures a customized approach to each specific design task. The proposed approach can be implemented in the design and modernization processes of freight cars, contributing to increased service life, reduced maintenance costs, and improved cargo transportation safety. The model enables automation of the coating selection process within computer-aided engineering decision support systems.

Key words: railway transport; transportation technologies; freight cars; maintenance; operation; reliability; protective coatings; automation; computer modeling

REFERENCES

- Chen, G., Wu, J., Wang, Z., Zhu, H., Zhu, S., & Zhang, Q. (2025). Armored polymer-fluid gels with integrated damping and impact protection across broad temperatures. *Science Advances*, *11*(15), eadv5292. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adv5292> (in English)
- Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, *21*(1), 28–34. Retrieved from <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636> (in English)
- Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2*(7 (98)), 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456> (in English)
- Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskiy, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2*(1 (92)), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080> (in English)
- Gomes, V. M. G., Lesiuk, G., Correia, J. A. F. O., & de Jesus, A. M. P. (2024). Fatigue Crack Propagation of 51CrV4 Steels for Leaf Spring Suspensions of Railway Freight Wagons. *Materials*, *17*(8), 1831. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17081831> (in English)
- Gong, W., Akbar, M. F., Jawad, G. N., Mohamed, M. F. P., & Wahab, M. N. A. (2022). Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*, *12*(11), 1790. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12111790> (in English)
- Gubenko, S. I., Ivanov, I. A., & Kononov, D. P. (2021). Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*, *51*(6), 400–415. DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091221060036> (in English)

8. Jin, G., Chen, G., Zhao, Z., Zhao, Z., Liu, L., & Qian, J. (2023). Preparation of a superior damping coating and study on vibration damping properties. *SN Applied Sciences*, 5, 220. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05451-3> (in English)
9. Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., & Nazdracheva, T. (2021). Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*, 288, 123115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115> (in English)
10. Rajendran, V., Prathuru, A., Fernandez, C., & Faisal, N. H. (2023). Corrosion monitoring at the interface using sensors and advanced sensing materials: methods, challenges and opportunities. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 58(3), 281–321. DOI: <https://doi.org/10.1080/1478422x.2023.2180195> (in English)
11. Sanyal, S., Park, S., Chelliah, R., Yeon, S.-J., Barathikannan, K., Vijayalakshmi, S., Jeong, Y.-J., Rubab, M., & Oh, D. H. (2024). Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection. *Coatings*, 14(3), 324. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030324> (in English)
12. Seo, J.-W., Hur, H.-M., & Kwon, S.-J. (2022). Effect of Mechanical Properties of Rail and Wheel on Wear and Rolling Contact Fatigue. *Metals*, 12(4), 630. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040630> (in English)
13. Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., & Mastepan, A. G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8> (in English)
14. Tang, S., Xu, H., Ao, N., Liu, Y., Zhang, J., Guo, H., Kan, Q., Kang, G., & Wu, S. (2024). Experimental investigation on corrosion fatigue crack initiation and growth of heat-treated U75V rail steel. *International Journal of Fatigue*, 178, 107973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107973> (in English)
15. Witek, L., & Łabuński, P. (2024). Experimental Investigation of Damping Properties of Selected Polymer Materials. *Materials*, 17(12), 3021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17123021> (in English)
16. Yimyai, T., Crespy, D., & Rohwerder, M. (2023). Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Advanced Materials*, 35(47), 2300101. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202300101> (in English)
17. Yuan, Y., Liu, X., Pu, G., Wang, T., & Guo, Q. (2021). Corrosion features and time-dependent corrosion model of Galfan coating of high strength steel wires. *Construction and Building Materials*, 313, 125534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125534> (in English)
18. Zhang, Z., Sun, X., Huang, S., Han, X., Zhu, P., Shi, C., & Zhang, T. (2021). Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of the Aluminum Alloy Components Repaired by Cold Spray with Al-Based Powders. *Metals*, 11(10), 1633. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11101633> (in English)

Надійшла до редколегії: 05.05.2025

Прийнята до друку: 26.09.2025

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БЛЯЄВ, В. В. БЛЯЄВА, П. С. КІРІЧЕНКО,
В. А. КОЗАЧИНА, В. М. ПОЛТОРАЦЬКА**
Математичне моделювання процесу нестационарної
теплопровідності крізь стінку 5

**О. А. БУБНОВА, В. А. МІРОШНИК, Р. В. МАРКУЛЬ,
П. Б. МАШИХІНА, О. В. БЕРЛОВ**
Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу
в підземних водах: прикладні аспекти 14

**О. О. МЕДВЕДЕВА, С. В. ДЗЮБА, О. Л. ТЮТЬКІН,
П. Б. МАШИХІНА, О. В. БЕРЛОВ**
Моделювання фільтрації та геоміграції при техногенному
впливу на ґрунтових води 21

**ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ
ТРАНСПОРТУ**

**М. І. БЕРЕЗОВИЙ, М. П. БОЖКО, В. В. МАЛАШКІН,
Т. В. БОЛВАНОВСЬКА, О. О. МАЗУРЕНКО**
Аналіз впливу взаємного розташування уповільнювачів
та обхідних колій на довжину гіркових горловин
і їх автоматизоване проєктування 29

**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ**

Є. А. ВЕЛЕГУРА, В. М. ГОРЯЧКІН
Застосування смарт-контрактів при формалізації ролей
у системах вантажних перевезень 40

Т. А. ЗАЙЦЕВА
Обернене моделювання механіки конструкційного
контакту із застосуванням методу скінченних
елементів 49

**О. М. КІСЕЛЬОВА, О. М. ПРИТОМАНОВА,
О. О. КУЗЕНКОВ**
Програмна реалізація алгоритму розв'язання динамічної
задачі оптимального розбиття множин в умовах
невизначеності 59

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО,
К. Ю. ШЕВЕЛЄВА**
Вплив імпульсів напруження на обмежену витривалість
при циклічному навантаженні термічно зміцненої
вуглецевої сталі 68

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ,
ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА
КОМПЛЕКСИ**

**Є. М. ЧУПРИНА, А. М. МУХА, О. І. БОНДАР,
С. В. ПЛАКСІН, Д. В. УСТИМЕНКО, О. О. ГОЛОТА**
Дослідження динамічних показників шляхової котушки
натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного
транспорту 79

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В. С. АНДРЕЄВ, В. О. П'ЄЛИК
Принципи та моделі розрахунку осідань фундаментів для
розрахунку деформацій ґрунтових основ 91

О. І. ДУБІНЧИК, І. М. ІЛЬНИЦЬКИЙ
Обґрунтування практичного застосування гвинтової палі
зі спіральною лопаттю (геошурупу) під час будівництва
пальових фундаментів 98

**В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ,
Г. П. ІВАНОВА**
Металеві конструкційні матеріали для виробництва
і ремонту деталей автомобілів: практика
та перспективи 111

**А. В. РАДКЕВИЧ, М. М. ЛЯХОВЕЦЬКА-ТОКАРСЬКА,
С. В. ГАВРИЛЮК**
Оптимізація енергоефективності будівлі
багатопрофільного медичного центру 130

О. Л. ТЮТЬКІН, І. В. ДЕМЧЕНКО
Чисельний аналіз напружено-деформованого стану двох
незакріплених взаємовпливних виробок колового
окреслення 145

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ,
О. Е. ХАУСТОВ, М. І. СТЕЦЕНКО**
Визначення складових елементів трикомпонентного
гібридного накопичувача енергії для plug-in енергетичної
установки рухомого складу 154

**О. В. НЕВЕДРОВ, О. М. ГОРОБЧЕНКО, Д. О. ЗАЙКА,
В. С. ТЕРЕЩЕНКО**
Прогнозування технічного стану гальмівної системи
тепловоза із застосуванням Марковського
методу аналізу 164

О. В. ФОМІН, О. С. КОЗИНКА
Математичне формулювання цільової функції підвищення
ефективності захисту несучих елементів вантажних
вагонів антивібраційними покриттями 174

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, V. V. BILIAIEVA,
P. S. KIRICHENKO, V. A. KOZACHYNA,
V. M. POLTORATSKA**
Mathematical Modeling of the Process of Non-Stationary Heat
Conduction Throughout the Wall 14

**O. A. BUBNOVA, V. A. MIROSHNYK, R. V. MARKUL,
P. B. MASHYKHINA, O. V. BERLOV**
Modelling of filtration and heat and mass transfer processes
in groundwater: applied aspects 14

**O. O. MEDVEDIEVA, S. V. DZIUBA, O. L. TIUTKIN,
P. B. MASHYKHINA, O. V. BERLOV**
Modeling of filtration and geomigration under anthropogenic
impact on groundwater 21

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

**M. I. BEREZOVIYI, M. P. BOZHKO,
V. V. MALASHKIN, T. V. BOLVANOVSKA,
O. O. MAZURENKO**
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 29

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING

Y. A. VELEHURA, V. M. HORIACHKIN
Application of Smart Contracts in the Formalization of Roles
in Freight Transportation Systems 40

T. A. ZAYTSEVA
Inverse Modeling of Structural Contact Mechanics Using
the Finite Element Method 49

**E. M. KISELEVA, O. M. PRYTOMANOVA,
O. O. KUZENKOV**
Software Implementation of an Algorithm for Solving
a Dynamic Problem of Optimal Set Partitioning Under
Uncertainty 59

MATERIAL SCIENCE

**I. O. VAKULENKO, S. O. PLITCHENKO,
K. Yu. SHEVELIEVA**
The Effect of Stress Pulses on the Limited Endurance Under
Cyclic Loading of Thermal-Hardened Carbon Steel 68

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

**Y. M. CHUPRYNA, A. M. MUKHA, O. I. BONDAR,
S. V. PLAGSIN, D. V. USTYMENKO, O. O. HOLOTA**
Research of the Dynamic Indicators of the Track Coil
of a Full-Scale Model of High-Speed Magnetic Levitation
Transport 79

TRANSPORT CONSTRUCTION

V. S. ANDRIEIEV, V. O. PIELYK
Principles and Models for Calculating Foundation Settlements
for Calculating Soil Base Deformations 91

O. I. DUBINCHYK, I. M. ILNYTSKYI
The Latest Technologies in the Development and Practical
Application of Helical Blade Screw Piles in Construction 98

**V. E. OLISHEVSKA, H. S. OLISHEVSKYI,
H. P. IVANOVA**
Metal Structural Materials for the Production and Repair
of Automobile Parts: Practice and Prospects 111

**A. V. RADKEVYCH, M. M. LIAKHOVETSKA-
TOKARIEVA, S. V. HAVRYLYUK**
Optimization of energy efficiency of a multi-profile medical
center building 130

O. L. TIUTKIN, I. V. DEMCHENKO
Numerical Analysis of the Stress-Strain State of Two
Unanchored Interacting Circular-Shaped Workings 145

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**B. G. LIUBARSKYI, S. G. BURIKOVSKYI,
O. Yd. KHAUSTOV, M. I. STETSENKO**
Determination of the Constituent Elements
of a Three-Component Hybrid Energy Storage Device
for a Plug-In Power Plant for Rolling Stock 154

**O. V. NEVEDROV, O. M. GOROBCHENKO,
D. O. ZAIKA, V. S. TERESHCHENKO**
Prediction of the Technical Condition of the Brake System
of a Diesel Locomotive using the Markov
Analysis Method 164

O. V. FOMIN, O. S. KOZYNKA
Mathematical Formulation of the Objective Function
for Improving the Protection Efficiency of Load-Bearing
Elements of Freight Cars Using Anti-Vibration
Coatings 174

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 статтею 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/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 3 (111) 2025

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 22,55. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

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. 3 (111) 2025

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 22,55. Circulation 100. Order no. 02/03

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

