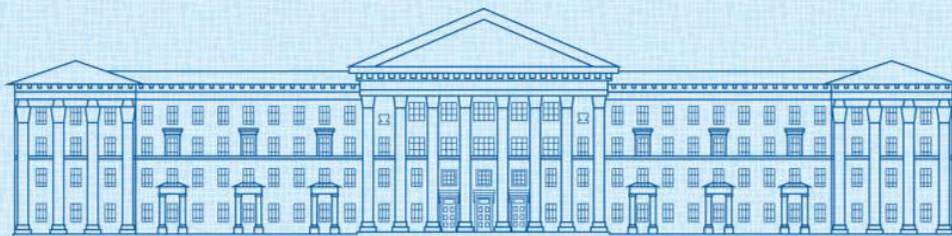




ISSN 2307-3489 (Print)  
ISSN 2307-6666 (Online)



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 2(106)

---

•• 2024 ••

Український державний університет науки і технологій

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 2 (106) 2024

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

2024

Засновник:  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Колесникова Т. О., кандидат наук  
із соціальних комунікацій

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:**

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляев М. М., УДУНТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакуленко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., УДУНТ (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); Кузнецов 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); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін 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.  
(До 28.09.2023 р.: Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України, свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.)  
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).  
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 26.06.2024 р., протокол № 12

Видавець

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

Адреса засновника  
та редакції

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

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровського інституту інженерів залізничного транспорту»;  
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. 2 (106) 2024**

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

2024

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief  
Deputy Chief Editor  
Executive Editor

Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics  
Kozachenko D. M., 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 Puluji National Technical University (Ukraine); Muradian L. A., 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); Śladkowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., USUST (Ukraine)

Journal  
was registered

Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023

(Until 28.09.2023: State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine, Certificate of registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012)

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

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

Published according to the Academic Council decision of the University from 26.06.2024, Protocol no. 12

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](mailto:stp.journal@ust.edu.ua); journal site: <http://stp.ust.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

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

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

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

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

since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

# АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.25-047.38:519.87

В. В. МАЛОВІЧКО<sup>1\*</sup>, Н. В. МАЛОВІЧКО<sup>2\*</sup>, Р. В. РИБАЛКА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0008-2704-5555

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта n.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0004-4093-9212

<sup>3\*</sup>Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517

## Створення математичної моделі станційного рейкового кола у вигляді скінченного дискретного автомата

**Мета.** Гарантування безпеки руху поїздів є обов'язковим завданням під час розвитку технічної оснащеності залізничного транспорту в Україні. Для діагностування та перевірки працездатності таких систем використовують імітаційні моделі напільних пристроїв, зокрема рейкового кола. Найбільш розповсюдженими є моделі у вигляді диференціальних рівнянь та в операторній формі. На жаль, вони не повністю підходять для розв'язання вказаної задачі. У зв'язку з цим виникає необхідність створення математичної моделі, яка простіше інтегрується для перевірки як релейних електричних централізацій, так і систем мікропроцесорної централізації. **Методика.** Для досягнення поставленої мети автори запропонували створити математичну модель у вигляді скінченного дискретного автомата. У цій роботі розглянуто створення моделі станційного рейкового кола як напрямленого графа. Під час створення моделі визначено вхідні та вихідні величини моделі та стани. Побудовано таблиці входів та виходів автомата, створено секвенційні вирази для абстрактної моделі автомата та виконано їх мінімізацію. Закодовано стани автомата за допомогою тригерних схем. **Результати.** У ході проведених досліджень було створено математичну модель рейкового кола у вигляді скінченного автомата моделі Мура, а також проведено перевірку її працездатності в програмному середовищі Proteus. Розроблена модель дозволяє імітувати роботу станційного рейкового кола на рівні абстракції, що оперує з двійковими сигналами. Це дозволяє спростити узгодження роботи моделі з програмними засобами мікропроцесорної централізації. У цілому з'явилась можливість більш ефективно перевіряти працездатність систем мікропроцесорної централізації на етапах проектування і під час уведення в експлуатацію. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель дозволяє визначити реакцію програмної частини мікропроцесорної централізації на поведінку рейкового кола в різних, зокрема нетипових режимах роботи, а також визначити реакцію системи станційної електричної централізації на окремі відмови і на виникнення декількох відмов одночасно. **Практичне значення.** Запропоновану математичну модель можна використовувати як для перевірки роботи систем мікропроцесорної централізації на стадії проектування та впровадження, так і для релейних систем централізації під час розробки діагностичних комплексів контролю їх працездатності.

**Ключові слова:** рейкове коло; математична модель; дискретний автомат; мікропроцесорна централізація; діагностування; граф

### Вступ

Відповідно до національної транспортної стратегії України, підвищення рівня безпеки перевезень та роботи пристроїв залізничної

автоматики є пріоритетним завданням [4]. У забезпеченні ефективної роботи транспортних магістралей ключову роль відіграють залізничні станції, які обладнані системами централізації релейного та мікропроцесорного типу [6].

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Мікропроцесорні системи централізації (МПЦ) є більш сучасними та перспективними для впровадження порівняно з релейними системами. Попри це в разі обладнання станції системами МПЦ також виникає ряд проблем, оскільки програмне забезпечення та мікропроцесорна частина системи не проходять повну перевірку на можливі відмови на стадії під'єднання до напільних об'єктів. У процесі запуску станції і включення її до поїзної роботи дільниці немає можливості перевірити всі нетипові режими роботи напільних об'єктів і їх вплив на роботу системи централізації загалом, оскільки це потребує значних затрат часу і повного виключення станції з поїзної роботи. Таку перевірку зазвичай виконує під час розробки системи виробник, але при цьому немає можливості приєднатись до реальних напільних об'єктів станції. У зв'язку з цим розробка математичних моделей напільних об'єктів, які дозволять виконувати імітаційне моделювання їх роботи на стадії проектування систем мікропроцесорного типу, є актуальною. Автори розробили математичні моделі стрілочного перевалу [2] та станційних світлофорів [1]. Щоб охопити всі станційні напільні об'єкти, ця робота присвячена розробці математичної моделі рейкового кола, яка дозволить розв'язувати задачі імітаційного моделювання під час перевірки систем МПЦ перед стадією впровадження.

### Мета

Основною метою цієї роботи є розробка математичної моделі станційного рейкового кола у вигляді, зручному для перевірки працездатності систем мікропроцесорної централізації на стадії їх упровадження. Створення математичної моделі у вигляді скінченного дискретного автомата дозволить імітувати роботу рейкового кола в бінарному коді, що спрощує узгодження роботи імітаційної моделі та програмних засобів мікропроцесорної централізації. Моделювання рейкового кола у вигляді дискретного автомата також спростить процедуру побудови електричної схеми на логічних елементах, яка дозволить створити фізичну модель для приєднання до модулів МПЦ. Також моделювання сприяє підвищенню надійності роботи електричної централізації

шляхом перевірки її поведінки в нетипових режимах роботи. Використання моделі у вигляді дискретного автомата дає можливість застосовувати її під час побудови систем діагностування електричної централізації з релейною елементною базою, оскільки в цьому випадку вихідні сигнали моделі 0 та 1 зручно використовувати за бінарної логіки роботи релейних схем.

### Методика

Під час аналізу наявних математичних моделей рейкових кіл визначено, що в основному всі моделі створюють або у вигляді диференціальних рівнянь, або в операторній формі [3, 8]. Таке представлення рейкового кола доволі зручне для його дослідження як окремого об'єкта. Проте для перевірки взаємозв'язків між постовою частиною мікропроцесорної централізації та напільними об'єктами такі математичні моделі незручні тому, що видають вихідні значення не у вигляді нулів та одиниць, а у вигляді аналогових величин. Автори пропонують створити математичну модель рейкового кола у вигляді скінченного дискретного автомата моделі Мура. Таке представлення об'єкта дозволяє отримати вихідні величини  $f$  саме у вигляді бінарних сигналів. Слід враховувати, що рейкові кола, на відміну від таких напільних об'єктів, як стрілка та світлофор, лише контролюють стан колії і передають цю інформацію в постову частину електричної централізації. Керування рейковим колом від постової частини електричної централізації та чергового по станції не відбувається [5], тому цей об'єкт дуже зручно відображати саме у вигляді дискретного автомата.

Дискретні автомати доволі часто використовують для побудови різних систем діагностування пристроїв автоматики [10], але для моделювання роботи станційних рейкових кіл їх раніше не використовували. Для кодування дискретного автомата визначимо вхідні величини  $a$  і  $b$ , які є змінними в її математичній моделі. Як вхідну величину  $a$  візьмемо стан рейкового кола, пов'язаний з наявністю або відсутністю рухомого складу в його межах. Для цього за величину  $a$  візьмемо відсутність об'єктів у межах ділянки контролю,

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

а її інверсне значення  $\bar{a}$  – позначатиме наявність рухомого складу в зоні контролю. За величину  $b$  візьмемо:  $b$  – рейкова лінія ціла;  $\bar{b}$  – рейкова лінія обірвана, тобто пошкоджені самі рейки або з'єднувачі рейкового кола. Як внутрішні стани дискретного автомата візьмемо основні режими роботи рейкового кола: – шунтовий режим;  $Q_1$  – нормальний режим;  $Q_2$  – контрольний режим. Допоміжні режими роботи рейкового кола, такі як режим автоматичної локомотивної сигналізації та короткого замикання, у запропонованій математичній моделі не реалізуються, оскільки безпосереднього впливу на роботу постової частини електричної централізації вони не мають і вихідний стан рейкового кола в цих режимах буде аналогічний стану  $Q_0$ .

Шунтовий режим роботи обрано як вихідний стан дискретного автомата, оскільки в цьому режимі на рейкове коло покладається найбільша відповідальність за безпеку руху в межах станції. Як вихідний сигнал для цієї математичної моделі візьмемо індикацію про стан ділянки контролю на пульті чергового по станції, яка у свою чергу залежить від стану реле контролю рейкового кола, тобто:  $f$  – реле, що контролює рейкове коло, отримує живлення;  $\bar{f}$  – реле вимкнене. Із використанням вхідних величин, внутрішніх станів та вихідних значень функції побудовано граф роботи станційного рейкового кола (рис. 1).

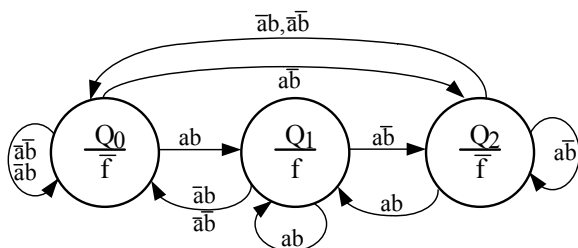


Рис. 1. Граф роботи станційного рейкового кола

Fig. 1. Schedule of the station rail circle operation

На базі створеного графа, що описує роботу рейкового кола, будують таблиці функцій переходів стану дискретного автомата та функції виходів (табл. 1, 2).

Таблиця 1

## Функції переходів

Table 1

## Transition functions

Стани	Вхідні сигнали			
	00	01	10	11
$Q_0$	$Q_0$	$Q_0$	$Q_2$	$Q_1$
$Q_1$	$Q_0$	$Q_0$	$Q_2$	$Q_1$
$Q_2$	$Q_0$	$Q_0$	$Q_2$	$Q_1$

Таблиця 2

## Функції виходів

Table 2

## Functions of the outputs

Стани	$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$
Вихідні сигнали	$\bar{f}$	$f$	$\bar{f}$

Для переходу від графа до аналітичних виразів представлення математичної моделі будують секвенційні рівняння на основі наведених таблиць:

$$\begin{aligned} \bar{a}\bar{b}Q_0 &\rightarrow Q_0; & \bar{a}\bar{b}Q_1 &\rightarrow Q_0; & \bar{a}\bar{b}Q_2 &\rightarrow Q_0; \\ \bar{a}bQ_0 &\rightarrow Q_0; & \bar{a}bQ_1 &\rightarrow Q_0; & \bar{a}bQ_2 &\rightarrow Q_0; \\ a\bar{b}Q_0 &\rightarrow Q_0; & a\bar{b}Q_1 &\rightarrow Q_0; & a\bar{b}Q_2 &\rightarrow Q_0; \\ abQ_0 &\rightarrow Q_1; & abQ_1 &\rightarrow Q_1; & abQ_2 &\rightarrow Q_1; \\ Q_0 &\rightarrow \bar{f}; & Q_1 &\rightarrow f; & Q_2 &\rightarrow \bar{f}. \end{aligned}$$

Отримані елементарні секвенційні рівняння, які направлені до однієї й тієї ж величини, записуємо через операцію логічного додавання. Як результат секвенційні рівняння на основі графа набувають такого вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{a}\bar{b}Q_0 \vee \bar{a}\bar{b}Q_1 \vee \bar{a}\bar{b}Q_2 \vee \bar{a}bQ_0 \vee \bar{a}bQ_1 \vee \bar{a}bQ_2 &\rightarrow Q_0; \\ abQ_0 \vee abQ_1 \vee abQ_2 &\rightarrow Q_1; \\ a\bar{b}Q_0 \vee a\bar{b}Q_1 \vee a\bar{b}Q_2 &\rightarrow Q_2; \\ Q_1 &\rightarrow f; \\ Q_0 \vee Q_2 &\rightarrow \bar{f}. \end{aligned}$$

Користуючись аналітичними способами мінімізації функції алгебри логіки, отримуємо скорочені рівняння, які мають вигляд:

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

$$\begin{aligned} \bar{a}(Q_0 \vee Q_1 \vee Q_2) &\rightarrow Q_0; \\ ab(Q_0 \vee Q_1 \vee Q_2) &\rightarrow Q_1; \\ a\bar{b}(Q_0 \vee Q_1 \vee Q_2) &\rightarrow Q_2; \\ Q_1 &\rightarrow f; \\ Q_0 \vee Q_2 &\rightarrow \bar{f}. \end{aligned}$$

Наведені секвенційні рівняння являють собою абстрактний дискретний автомат, що імітує роботу станційного рейкового кола. Щоб використати імітаційну модель для визначення поведінки МПЦ під час тестування, необхідно на базі абстрактного автомата створити схему на логічних елементах, яка буде імітувати роботу рейкового кола. Для збереження інформації про попередні стани автомата, використовуємо 2 JK-тригери.

Для кожного з трьох станів автомата відповідно встановлюють стан тригерних схем, що наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Стани чарунок пам'яті

Table 3

States of memory cells

Стан автомата	Стан тригерних схем	
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
Q <sub>0</sub>	0	0
Q <sub>1</sub>	0	1
Q <sub>2</sub>	1	0

Для реалізації залежності між станами моделі та позицією тригерів складаємо таблицю функцій збудження для тригерів відповідно до логіки їх роботи (табл. 4).

Таблиця 4

Кодування станів тригерних схем

Table 4

Coding of triggered circuit states

Стани автомата			Функції збудження тригерів			
Q <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>0</sub>	J <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>
0	0	0	–	–	–	–
0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	–	–	–	–

Продовження табл. 4

Continuation of Table 4

Стани автомата			Функції збудження тригерів			
Q <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>0</sub>	J <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>
1	0	0	1	0	0	1
1	0	1	–	–	–	–
1	1	0	–	–	–	–
1	1	1	–	–	–	–

Оскільки дискретний автомат має лише три визначених стани, то, відповідно, тригерні схеми також однозначно працюють лише на трьох позиціях таблиці. Для всіх інших рядків стан тригерів є невизначеним. Для побудови схеми з мінімально можливою кількістю елементів скористась методом мінімізації за допомогою карт Карно (див. рис. 2).

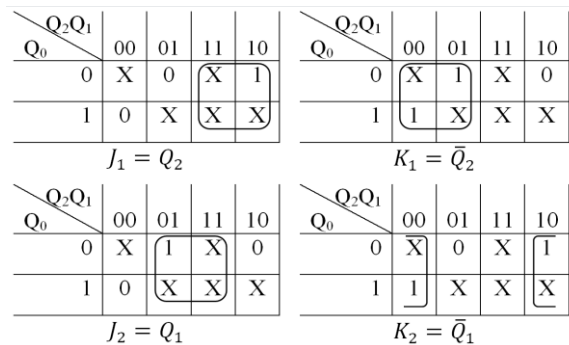


Рис. 2. Мінімізація функцій збудження тригерів за допомогою карт Карно

Fig. 2. Minimization of trigger excitation functions using Carnot maps

Результати

За результатами мінімізації секвенційних рівнянь та тригерних схем створено структурну схему дискретного автомата станційного рейкового кола. Для перевірки роботи створеної математичної моделі виконано її реалізацію в середовищі Proteus (рис. 3) [7]. Для підтвердження адекватності роботи створеної моделі за допомогою наведеної схемної реалізації було перевірено правильність переходів графа з кожного стану у відповідне положення в разі подачі всіх можливих вхідних комбінацій. У результаті виявлено відповідність роботи наведеної схеми таблицям входів та виходів моделі (табл. 1, 2).

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

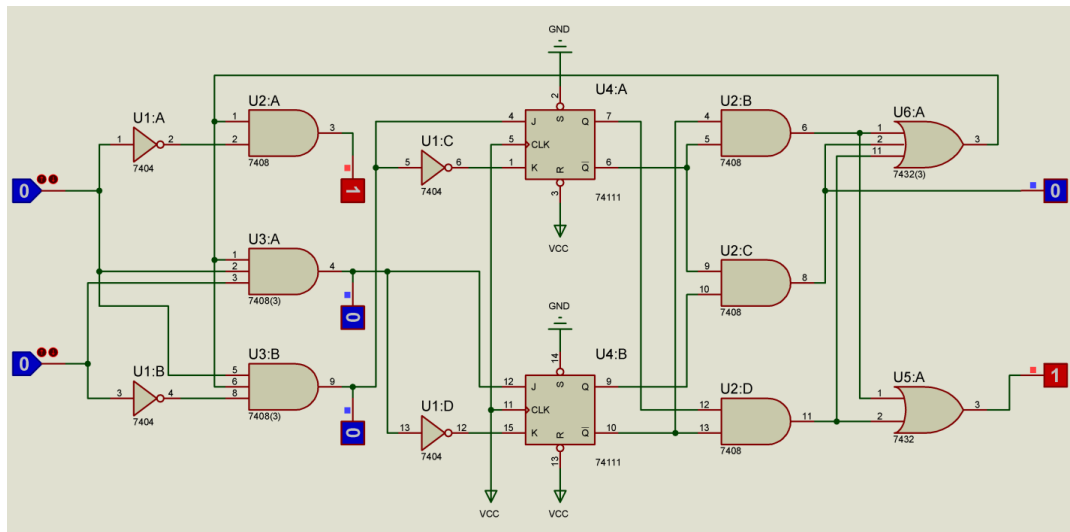


Рис. 3. Схема дискретного автомата станційного рейкового кола

Fig. 3. Scheme of the discrete automaton of the stationary rail circuit

### Наукова новизна та практична значимість

У ході проведених досліджень як математичну модель, що імітує роботу станційного рейкового кола, вибрано модель у вигляді скінченного дискретного автомата з трьома стійкими станами. Використання розробленої моделі дозволяє:

- скоротити час на перевірку правильності роботи систем мікропроцесорної централізації в разі їх впровадження на залізничному транспорті;
- визначити реакцію програмної частини мікропроцесорної централізації на нетипову поведінку напільних об'єктів, зокрема рейкових кіл;
- на стадії створення мікропроцесорних систем проводити більш глибоку перевірку їх

поведінки під час встановлення маршрутів та виникнення різних відмов пристроїв, а також комбінації таких подій;

– імітувати роботу рейкового кола під час розробки систем діагностування та контролю електричної централізації на релейній елементній базі [9].

### Висновки

Використання розробленої математичної моделі у формі дискретного автомата дозволить значно підвищити функцій надійність роботи мікропроцесорної централізації та спростити процеси побудови діагностичних комплексів для систем централізації на релейній елементній базі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Маловічко В. В., Маловічко Н. В. Математична модель роботи чотирьохзначного станційного вихідного світлофора у вигляді дискретного автомату моделі Мура. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 15. С. 70–78.
2. Маловічко В. В., Рибалка Р. В., Маловічко Н. В., Тимошенко Л. С. Представлення роботи стрілочного перевалу у вигляді дискретного автомату моделі Мура. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2013. № 6. С. 47–51.
3. Мойсеєнко В. І., Огар О. М., Гаєвський В. В. Розвиток залізничних цифрових систем та технологій у контексті інженерії 4.0. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 3. С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i3.170647>
4. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

5. Стандарт СТД 13-005:2020 «Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Порядок технічного обслуговування», рішення правління АТ «Укрзалізниця» від 18.06.2020 (протокол № Ц-45/52 Ком. т.). Київ : Акціонерне Товариство «Українська залізниця», 2020. 116 с.
6. *Транспорт і зв'язок України – 2010-2019*. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv\\_u/08/Arch\\_tr\\_zb.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/08/Arch_tr_zb.htm)
7. Шамо́ня В., Семеніхі́на О., Друшляк М. Використання середовища Proteus для візуального моделювання роботи базових елементів інформаційної системи. *Фізико-математична освіта*. 2019. Вип. 2 (20). С. 160–165. DOI: <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2019-020-2-025>
8. Aliev R., Aliev M., Tokhirov E. Analysis, development of a model and an algorithm in the concept of the growth of tone jointless rail circuits. *Transportation Research Procedia*. 2022. № 63. P. 178–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.003>
9. Malovichko V., Rybalka R., Malovichko N., Honcharov K. Determining the Set of Elements for Automatic Monitoring and Diagnosing the Relay Interlocking System. *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022*. (Kaunas, 05–07 Oct. 2022). Kaunas, 2022. Pt. II. P. 509–514.
10. Unger S., Heinrich M., Scheuermann D., Katzenbeisser S., Schubert M., Hagemann L., Iffländer L. Securing the Future Railway System: Technology Forecast, Security Measures, and Research Demands. *Vehicles*. 2023. Vol. 5. Iss. 4. P. 1254–1274. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles5040069>

V. V. MALOVICHKO<sup>1\*</sup>, N. V. MALOVICHKO<sup>2\*</sup>, R. V. RYBALKA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail [v.v.malovichko@ust.edu.ua](mailto:v.v.malovichko@ust.edu.ua), ORCID 0009-0008-2704-5555

<sup>2\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail [n.v.malovichko@ust.edu.ua](mailto:n.v.malovichko@ust.edu.ua), ORCID 0009-0004-4093-9212

<sup>3\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail [r.v.rybalka@ust.edu.ua](mailto:r.v.rybalka@ust.edu.ua), ORCID 0000-0001-7444-0517

## Creation of a Mathematical Model of a Stationary Rail Circuit in the Form of a Finite Discrete Automaton

**Purpose.** Ensuring the safety of train traffic is a mandatory task in the development of technical equipment of railway transport in Ukraine. To diagnose and verify the performance of such systems, simulation models of overhead devices, in particular, the rail circle, are used. The most commonly used models are in the form of differential equations and in operator form. Unfortunately, they are not fully suitable for solving this problem. In this regard, there is a need to create a mathematical model that is easier to integrate for checking both relay electrical interlocking and microprocessor-based interlocking systems. **Methodology.** To achieve this goal, the authors proposed to create a mathematical model in the form of a finite discrete automaton. This paper considers the creation of a model of a station rail circuit as a directed graph. During the creation of the model, the input and output values of the model and the states are determined. The tables of inputs and outputs of the automaton are constructed, sequential expressions for the abstract model of the automaton are created, and their minimization is performed. The states of the automaton are coded using trigger circuits. **Findings.** In the course of the research, a mathematical model of the rail circle in the form of a Moore model finite automaton was created, and its performance was tested in the Proteus software environment. The developed model allows to simulate the operation of a stationary rail circuit at the level of abstraction, which operates with binary signals. This makes it possible to simplify the coordination of the model with microprocessor-based centralization software. In general, it is now possible to more effectively check the performance of microprocessor-based interlocking systems at the design and commissioning stages. **Originality.** The developed mathematical model makes it possible to determine the response of the microprocessor-based centralization software to the behavior of the rail circuit in various, in particular atypical, operating modes, as well as to determine the response of the station electrical centralization system to individual failures and to the occurrence of several failures simultaneously. **Practical value.** The proposed mathematical model can be used both to check the operation of microprocessor-based centralization systems at the design and implementation stages and for relay centralization systems when developing diagnostic complexes for monitoring their performance.

**Keywords:** rail circuit; mathematical model; discrete automaton; microprocessor-based centralization; diagnostics; graph

## REFERENCES

1. Malovichko, V. V., & Malovichko, N. V. (2018). The mathematical model of operation of the four-unit station exit signal as a Moor discrete automaton. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 15, 70-78. (in Ukrainian)
2. Malovichko, V. V., Rybalka, R. V., Malovichko, N. V., & Tymoshenko, L. S. (2013). Representation of switch operation as discrete automaton Moore's machine kind. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 6, 47-51. (in Ukrainian)
3. Moiseienko, V. I., Ohar, O. M., & Gaievskiy, V. V. (2019). The development of railway digital systems and technologies in the context of engineering 4.0. *Information and control systems at railway transport*, 3, 11-20. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i3.170647> (in Ukrainian)
4. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku.* (2018). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#Text> (in Ukrainian)
5. «Prystroji syhnalizatsii, tsentralizatsii ta blokuvannia. Poriadok tekhnichnoho obsluhovuvannia», rishennia pravlinnia AT «Ukrzaliznytsia» vid 18.06.2020 (protokol # Ts-45/52 Kom. t.), 116 Standart STP 13-005:2020. (2020). Kyiv. (in Ukrainian)
6. *Transport i zviazok Ukrainy – 2010-2019.* Retrieved from [http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv\\_u/08/Arch\\_tr\\_zb.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/08/Arch_tr_zb.htm) (in Ukrainian)
7. Shamonia, V., Semenikhina, O., & Drushlyak, M. (2019). Use of the proteus for visual modeling of the work of the information system basic elements. *Physical and Mathematical Education*, 20(2), 160-165. DOI: <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2019-020-2-025> (in Ukrainian)
8. Aliev, R., Aliev, M., & Tokhirov, E. (2022). Analysis, development of a model and an algorithm in the concept of the growth of tone jointless rail circuits. *Transportation Research Procedia*, 63, 178-186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.003> (in English)
9. Malovichko, V., Rybalka, R., Malovichko, N., & Honcharov, K. (2022, Oct.). Determining the Set of Elements for Automatic Monitoring and Diagnosing the Relay Interlocking System. In *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022* (Pt. II, pp. 509–514). Kaunas, Lithuania. (in English)
10. Unger, S., Heinrich, M., Scheuermann, D., Katzenbeisser, S., Schubert, M., Hagemann, L., & Iffländer, L. (2023). Securing the Future Railway System: Technology Forecast, Security Measures, and Research Demands. *Vehicles*, 5(4), 1254-1274. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles5040069> (in English)

Надійшла до редколегії: 09.02.2024

Прийнята до друку: 10.06.2024

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 621.6.033:621.642-049.65

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1</sup>, І. В. КАЛАШНІКОВ<sup>2</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4</sup>,  
В. М. ПОЛТОРАЦЬКА<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3</sup>Каф. охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 247 16 01, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>4\*</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, , 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup>Каф. екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 71, ел. пошта poltoratskaya.viktoriia@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

### Використання габіонів для захисту від ураження нафтосховища

**Мета.** Під час вибуху дрона утворюють уламки, що спричиняють ризик ураження як людини, так і об'єктів на промисловому майданчику. Тому основною метою роботи є оцінювання ефективності використання габіонів із різними наповнювачами для зменшення ризику ураження стінки нафтосховища уламками, що з'являються під час вибуху дрона на промисловому майданчику, а також аналіз величини позаперешкодної швидкості руху уламків. **Методика.** Для аналізу ефективності використання габіонів як захисних споруд нафтосховища під час розлітання уламків дрона використано чисельну модель, що базується на інтегруванні рівняння руху матеріальної точки. Рівняння руху уламка базуються на другому законі Ньютона. Такий підхід дозволяє визначити позаперешкодну швидкість уламка після проходження тіла захисної перешкоди – габіону. Побудована чисельна модель враховує початкову швидкість уламка, його розмір, напрям руху, висоту викиду, а також матеріал, яким наповнено тіло габіону. На базі цієї чисельної моделі створено комп'ютерну програму для проведення обчислювального експерименту. **Результати.** Розроблено ефективний інструмент аналізу ризику ураження нафтосховища від металевих уламків, що утворюються в разі вибуху дрона, та аналізу ефективності використання габіонів. Подано результати обчислювальних експериментів. **Наукова новизна.** Побудовано швидкорозрахункову чисельну модель для оперативного аналізу ефективності використання габіонів, які мають різне наповнення та які використовують для захисту нафтосховища на промисловому майданчику від металевих уламків, що утворюються під час вибуху дрона. **Практична значимість.** Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку динаміки руху уламків у повітрі та в тілі габіону. Використання цієї програми дозволяє підібрати раціональні розміри захисної перешкоди – габіону на промисловому майданчику для захисту нафтосховища від ураження.

*Ключові слова:* габіон; розлітання уламків; ризик ураження; динаміка руху уламка; чисельне моделювання

#### Вступ

У разі екстремальних ситуацій на промислових майданчиках можлива поява різних вражаючих факторів, наприклад, поява в повітрі токсичних речовин, створення вогняної кулі

тощо [1, 7–10]. Для оцінювання наслідків таких екстремальних ситуацій використовують різні математичні моделі [2–4, 8, 9]. У випадку вибухів на промисловому майданчику має місце розлітання уламків, які створюють ризик ураження персоналу та об'єктів через їх рух зі знач-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ною швидкістю. Якщо в таких місцях розташовані сховища нафтопродуктів, то уламки, що утворюються під час вибуху, можуть пошкодити корпус нафтосховища. Це призведе до вилиття продуктів, пожежі на промисловому майданчику, викиду в атмосферне повітря продуктів пожежі та появи теплового забруднення довкілля. Таким чином, дуже важливо розробляти засоби захисту нафтосховищ у разі розлітання уламків під час вибухів дронів. Це дає підстави для проведення наукових досліджень з метою вдосконалення систем захисту нафтосховищ на промислових майданчиках у разі розлітання уламків.

### Мета

Основною метою роботи є оцінювання ефективності використання габіону з різним наповненням для зниження ризику ураження нафтосховища уламками, що утворюються після вибуху.

### Методика

Розглядаємо задачу розлітання уламків від вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані нафтосховища. Для захисту корпусу нафтосховища від металевих уламків пропонуємо використати габйон з різним наповненням. Для розв'язання цієї задачі використовуємо побудовану чисельну модель.

Уламки, що утворюються під час вибуху дрона, мають різну геометричну форму, масу, швидкість руху.

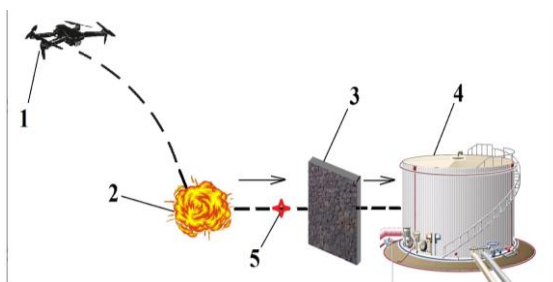


Рис. 1. Розташування габіону на промисловому майданчику:

1 – дрон; 2 – місце вибуху; 3 – габйон;  
4 – нафтосховище; 5 – уламок

Fig. 1. Location of the gabion on the industrial site:

1 – drone; 2 – place of explosion; 3 – gabion;  
4 – oil storage; 5 – fragment

Крім цього, уламки можуть утворюватися на різній висоті та рухатися під різним кутом до об'єкта, який потрібно захистити (далі –

об'єкт). Для побудови математичної моделі руху уламка та взаємодії його з корпусом захисної перешкоди (габйон) робимо такі припущення:

- 1) уламок має форму конуса;
- 2) маса уламка – відома;
- 3) швидкість та напрям руху уламка від точки вибуху – відомі;
- 4) відома довжина від місця розлітання уламків до габіону та об'єкта;
- 5) кут  $\alpha$  вилітання уламка відносно поверхні землі – відомий;
- 6) відома щільність  $\rho_{ст}$  матеріалу захисної перешкоди (габіону).

Траєкторію руху уламка від місця вибуху до об'єкта розбиваємо на три частини :

- зона № 1 – від місця вибуху до габіону;
- зона № 2 – рух уламка всередині габіону з піском;
- зона № 3 – рух уламка від габіону до об'єкта (якщо уламок пройде зону № 2).

Динаміку руху уламка в кожній зоні будемо описувати за допомогою другого закону Ньютона:

$$m \frac{dV}{dt} = -F_R - F_g, \quad (1)$$

де  $m$  – маса уламка;  $V$  – вектор швидкості руху уламка в середовищі;  $F_g = mg$  – сила тяжіння;

$F_R = C_x \frac{\rho_B V^2}{2} \cdot S$  – сила опору уламка;  $C_x$  – коефіцієнт опору уламка;  $\rho_B$  – щільність середовища;  $S$  – площа мідельового перерізу уламка;  $t$  – час.

Слід відзначити, що значення коефіцієнта опору  $C_x$  для другої зони (рух уламка в піску) відрізняється від значення цього коефіцієнта для першої та третьої зон (рух уламка в повітрі).

Для практичного використання рівняння (1) запишемо його в проекції на осі координат для кожної зони :

$$m \frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_B V^2}{2} \cdot S \cdot u; \quad (2)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_B V^2}{2} \cdot S \cdot v - mg, \quad (3)$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де  $u$ ,  $v$  – проекції вектора швидкості руху уламка на осі координат. Відзначимо, що вісь  $Y$  напрямлена вертикально вгору, а вісь  $X$  – у напрямі горизонтального руху уламка.

Далі здійснюємо чисельне інтегрування рівнянь (2) і (3) для визначення швидкості руху уламка в кожній зоні. Коефіцієнт опору  $C_x$  для першої та третьої зони беремо 0,5, для другої зони – 0,85 (С.І. Герасімов, В.І. Єрофєєв та інші).

Для розв'язання моделювальних рівнянь (2) і (3) використовуємо метод Ейлера [5]. Розрахунок значень компонент швидкості руху уламка  $u$ ,  $v$  на новому часовому відрізку « $n+1$ » здійснюємо на базі таких залежностей:

$$u^{n+1} = u^n - dt * C_x \frac{\rho_b V^2}{2m} \cdot S \cdot u; \quad (9)$$

$$v^{n+1} = v^n - dt * C_x \frac{\rho_b V^2}{2m} \cdot S \cdot v - dt * g. \quad (10)$$

Для проведення розрахунку на базі залежностей (9) і (10) потрібно задати кут  $\alpha$  вилітання уламка.

Дальність  $x(t)$  відлітання уламка від місця вибуху визначаємо з виразу:

$$x(t) = x_0 - dt \cdot V,$$

де  $x_0$  – координата місця відлітання уламка.

Здійснено програмування чисельної моделі та створено код «Drone–2N». Мова програмування – FORTRAN. Код дає інформацію про швидкість руху уламка до габіону, усередині габіону та за габіоном. Беремо, що якщо за габіоном (тобто уламок прошив тіло габіону) позаперешкодна швидкість уламка  $V_b$  не перевищує 0,2 м/с, то габіон працює ефективно. Але цей критерій є достатньо умовним.

### Результати

На базі побудованої чисельної моделі та створеного коду проведено параметричні дослідження. Визначено ефективність використання габіону для двох сценаріїв:

– перший сценарій: тіло габіону – мокрий пісок, щільність  $\rho = 1\,920 \text{ кг/м}^3$ ;

– другий сценарій: тіло габіону містить різні наповнювачі – тирса деревна, макуха, земля суха.

Як перше наближення розглянуто випадок, коли уламок після вибуху рухається горизонтально в напрямку об'єкта ( $\alpha = 0$ ).

Таблиця 1

#### Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 1, маса уламка 0,03 кг)

Table 1

#### The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 1, the mass of the fragment is 0.03 kg)

Початкова швидкість уламка, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,08	0,96
500	0,08	1,05
800	0,08	1,10

Розрахунок для першого варіанта здійснено за таких даних: вибух має місце на відстані 25 м від нафтосховища, захисна перешкода розташована на відстані 12 м від нафтосховища. Висота викиду уламка 2 м, маса уламка 0,03 та 0,07 кг. Початкова швидкість уламка варіюється. Результати розрахунку для цих параметрів показані в табл. 1 і 2.

Таблиця 2

#### Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 1, маса уламка 0,07 кг)

Table 2

#### The value of the debris velocity beyond the obstacle (Scenario 1, the mass of the fragment is 0.07 kg)

Початкова швидкість уламка, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,18	2,01
500	0,19	2,25
800	0,19	2,37

Аналіз даних із табл. 1 і 2 показує, що для уламка масою 0,03 кг товщина габіону порядку 1,1 м, із цим наповнювачем, може бути ефективною. Для уламка масою 0,07 кг ефективною є товщина габіону порядку 2,4 м.

Для другого сценарію задачі щільність наповнювача габіону була така:

– тирса деревна  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ;

– макуха  $\rho = 590 \text{ кг/м}^3$ ;

– земля суха  $\rho = 1\,100 \text{ кг/м}^3$ .

Розрахунок для другого сценарію здійснено за таких даних: маса уламка 0,02 кг. Початкова швидкість уламка варіюється. Результати розрахунку для цих параметрів показано в табл. 3 – 5.

Таблиця 3

**Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 2, тирса деревна)**

Table 3

**The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 2, wood sawdust)**

Початкова швидкість уламка, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,16	2,65
500	0,25	2,98
800	0,25	3,15

Таблиця 4

**Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 2, макуха)**

Table 4

**The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 2, oilcake)**

Початкова швидкість уламку, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,17	1,89
500	0,17	2,11
800	0,17	2,22

Таблиця 5

**Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 2, земля суха)**

Table 5

**The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 2, the ground is dry)**

Початкова швидкість уламку, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,09	1,09
500	0,09	1,21
800	0,09	1,26

Як бачимо з табл. 3 – 5, на ефективність затримання уламка суттєво впливає щільність матеріалу в тілі габіону. Так, якщо використано тирсу деревну, то для розглянутих параметрів товщина габіону порядку 3 м неефективна. Для сухої землі як наповнювача можна використовувати габіон товщиною порядку 1,3 м.

Відзначимо, що час розрахунку складає 2 с.

**Наукова новизна та практична значимість**

Запропоновано чисельну модель для оцінювання ефективності використання габіону, який має різне наповнення. Габіон використовують на промисловому майданчику для захисту корпусу нафтоховища від ураження уламками дрона.

Математична модель базується на чисельному інтегруванні рівняння нестационарного руху матеріальної точки в повітряному просторі та в тілі габіону для визначення позаперешкодної швидкості уламка.

Розроблена чисельна модель дозволяє визначити раціональні розміри габіону для зниження ризику пошкодження стінки нафтоховища.

**Висновки**

1. Створено багатопараметричну математичну модель руху уламка в повітряному середовищі та в «тілі» габіона.

2. На базі побудованої математичної моделі створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту з метою визначення ефективності використання захисних перешкод (габіонів) на території промислового майданчика.

3. Проведено обчислювальний експеримент, що дав можливість визначити раціональну товщину габіону, для заповнення якого використано пісок, тирсу деревну, макуху та землю суху.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Берлянд М. Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
3. Бруяцкий Е. В. *Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов*. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
5. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Al-Zghoul B. M., Abu-El-Sha`r W. Y. New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*. 2020. Vol. 20. Iss. 1. P. 119–127. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0433>
7. Barret A. M. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness* : Dissertation. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2009. 123 p.
8. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. P. 87–91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
9. 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, No 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
10. Tseng J. M., Su T. S., Kuo C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 45. P. 384–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.175>
11. Zavila O., Dobes P., Dlavka J., Bitta J. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*. 2015. Vol. 2. P. 1–9.

M. M. BILIAIEV<sup>1</sup>, I. V. KALASHNIKOV<sup>2</sup>, O. V. BERLOV<sup>3\*</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>4</sup>,  
V. M. POLTORATSKA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup>Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport», JSC «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, Ukraine, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail [uzp38@ukr.net](mailto:uzp38@ukr.net), ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup>Dep. of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, Architect Oleg Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail [berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup>Dep. of Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, Architect Oleg Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(056) 756 33 71, e-mail [poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua](mailto:poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua), ORCID 0000-0002-6244-8439

## Using Gabions to Protect Oil Storage Facilities from Damage

**Purpose.** During a drone explosion, debris is generated that poses a risk of damage to both humans and objects at an industrial site. Therefore, the main purpose of this study is to evaluate the effectiveness of using gabions with different fillers to reduce the risk of damage to the wall of an oil storage facility by debris generated during a drone explosion at an industrial site, as well as to analyze the value of the out-of-band velocity of the debris. **Methodology.** A numerical model based on the integration of the equation of motion of a material point was used to analyze the effectiveness of using gabions as protective structures of an oil storage facility during the flying of drone debris. The equations of motion of the debris are based on Newton's second law. This approach makes it possible to determine the unobstructed velocity of the fragment after passing the body of the protective barrier - the gabion. The developed numerical model takes into account the initial velocity of the fragment, its size, direction of movement,

ejection height, and the material that fills the gabion body. On the basis of this numerical model, a computer program was created to conduct a computational experiment. **Findings.** An effective tool has been developed to analyze the risk of damage to the oil storage facility from the metallic impact of debris generated in the event of a drone explosion and to analyze the effectiveness of gabions. The results of computational experiments are presented. **Originality.** A fast-calculating numerical model has been built for the operational analysis of the efficiency of using gabions with different contents, which are used to protect an oil storage facility at an industrial site from the missile impact of debris generated by a drone explosion. **Practical value.** A computer program has been developed to calculate the dynamics of debris movement in the air and in the body of the gabion. The use of this program makes it possible to select the rational dimensions of a protective barrier - gabion at an industrial site to protect an oil storage facility from damage.

*Keywords:* gabion; debris scattering; risk of damage; dynamics of debris movement; numerical modeling

## REFERENCES

1. Basmanov, A. 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)
2. Berlyand, M. Ye. (1985). *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
3. Bruyatskiy, Ye. V. (2000). *Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv : Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine. (in Russian)
4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian)
6. Al-Zghoul, B. M., & Abu-El-Sha'r, W. Y. (2020). New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(1), 119-127. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0433> (in English)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburg. (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. In *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* (pp. 87-91). DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15) (in English)
9. 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)
10. Tseng, J. M., Su, T. S., & Kuo, C. Y. (2012). Consequence Evaluation of Toxic Chemical Releases by ALOHA. *Procedia Engineering*, 45, 384-389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.175> (in English)
11. Zavila, O., Dobes, P., Dlavka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*, 2, 1-8. (in English)

Надійшла до редколегії: 20.02.2024

Прийнята до друку: 29.06.2024

**УДК 556.32:504.5**М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, В. В. КОЗАЧИНА<sup>2</sup><sup>1</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882<sup>2</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306**Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах**

**Мета.** Інфільтрація забруднених вод, аварійні розливи хімічно небезпечних речовин у ґрунтові води призводять до формування у водоносних шарах значних за розмірами зон техногенного забруднення. Тому важливою є розробка систем захисту від забруднення підземних вод. Для аналізу ефективності роботи таких систем захисту на етапі проєктування потрібно мати науково обґрунтовану інформацію про динаміку зміни зон забруднення у підземних водах. Така інформація може бути отримана за допомогою методу математичного моделювання. Робота спрямована на створення чисельної моделі для розрахунку нестационарного процесу геоміграції за умови застосування хімічного захисту підземних вод від забруднення. **Методика.** Для опису динаміки підземних потоків розглянуто два рівняння фільтрації, що дозволяють проводити математичне моделювання процесу фільтрації як під час розв’язання планових задач, так і для розв’язання задач профільної фільтрації. Для аналізу зміни якості підземних вод використано двовимірне рівняння геоміграції. Це рівняння враховує конвективний перенос домішки у фільтраційному потоці, дисперсію, інтенсивність інфільтрації домішки в підземний потік. Також це рівняння використано для розрахунку руху нейтралізатора у ґрунтових водах. Чисельне інтегрування рівняння фільтрації проведено за допомогою скінченнорізницьових методів. Для чисельного інтегрування рівняння геоміграції використано неявну схему розщеплення. **Результати.** Побудовано швидкозастосовну чисельну модель розрахунку динаміки ґрунтових вод. Модель є також платформою для розв’язання іншої важливої задачі – розрахунку процесів геоміграції. Запропоновано чисельну модель розрахунку нестационарного процесу геоміграції, що дає можливість оцінювати не тільки процес формування зон забруднення в потоці ґрунтових вод, але і визначати ефективність методу нейтралізації домішки в підземному потоці. **Наукова новизна.** Побудовано ефективні чисельні моделі для експрес-оцінювання зміни динаміки ґрунтових вод та їх якості під дією техногенного джерела. Ці моделі враховують комплекс важливих фізичних факторів, що впливають на процес геоміграції та процес нейтралізації домішки в підземному потоці. **Практична значимість.** Розроблено комп’ютерну програму, що дозволяє методом обчислювального експерименту визначати ефективність процесу нейтралізації агресивної домішки в ґрунтових водах з метою їх захисту від техногенного забруднення.

*Ключові слова:* динаміка підземних вод; ґрунтові води; масоперенос; математичне моделювання; техногенне забруднення

**Вступ**

Серед сучасних проблем будівництва на підтоплених територіях можна виділити дві важливі задачі: аналіз динаміки підземних вод (у першу чергу – підтоплення); забруднення ґрунтових вод (першого від поверхні землі водоносного шару) [1–6]. Особливо слід відзначити, що підвищення рівня ґрунтових вод відбувається в районах, де має місце зміна гідрогеологічного режиму внаслідок будівництва ставків-накопичувачів стічних вод від різних підприємств (рис. 1). Вплив таких техногенних джерел розповсюджується на значну відстань.



Рис. 1. Ставок-відстійник  
([https://www.pseau.org/outils/ouvrages/irc\\_university\\_of\\_leeds\\_waste\\_stabilization\\_ponds\\_2004.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/irc_university_of_leeds_waste_stabilization_ponds_2004.pdf))

Fig. 1. Settling pond  
([https://www.pseau.org/outils/ouvrages/irc\\_university\\_of\\_leeds\\_waste\\_stabilization\\_ponds\\_2004.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/irc_university_of_leeds_waste_stabilization_ponds_2004.pdf))

Забруднення ґрунтових вод виникає передусім унаслідок інфільтрації забруднених стічних вод зі ставків. Таким чином, наявність ставків призводить не тільки до зростання рівня ґрунтових вод (починається процес підтоплення території), але й до суттєвого зниження якості підземних вод. Ситуацію може погіршувати ще й той факт, що, крім зниження якості підземних вод, стічні води, що потрапляють у підземний потік зі сховищ, можуть бути агресивними та з часом впливати на стійкість фундаменту споруд, підземні комунікації тощо [7]. Крім цього, інтенсивне забруднення ґрунтових вод має місце в разі інфільтрації різного роду домішок у ґрунтові води від промислових майданчиків або у випадку аварійних витоків на транспорті, підприємствах. Важливо підкреслити, що розв'язання задач геоміграції забруднювальних речовин у підземних водах базується на попередньому розв'язанні задачі динаміки підземних вод. Таким чином, постає актуальне питання прогнозування якості підземних вод під дією техногенних джерел забруднення.

У наш час для розв'язання задач цього класу використовують емпіричні та аналітичні моделі, що дають можливість визначити динаміку підземних вод та вплив дренажних систем на її зміну [2, 6]. Такі моделі є ефективними в інженерній практиці, але з їх допомогою можна отримати прогнозні дані лише для «спрощених» сценаріїв. У зв'язку з підвищенням рівня вимог до прогнозних результатів усе більше постає потреба у використанні чисельних моделей для розв'язання актуальних задач динаміки підземних вод та геоміграції [10, 11]. Відкритим питанням залишається створення математичних моделей для розв'язання задач геоміграції у контексті застосування їх до проблем захисту підземних вод від забруднення внаслідок різних технологій, наприклад, встановлення підземних захисних стін, використання різного роду дренажу, використання хімічних засобів захисту підземних вод від агресивних домішок тощо.

### Мета

Автори передбачають створення чисельної моделі для розрахунку нестационарного процесу геоміграції в разі застосування хімічного захисту підземних вод від забруднення.

### Методика

Розглядаємо задачу хімічної нейтралізації агресивної домішки (кислоти) в ґрунтовому потоці. Для нейтралізації пропонуємо створити в підземному потоці спеціальну зону на зразок шурфу (далі – нейтралізувальний елемент). До цієї зони подають нейтралізатор. Особливістю створеної зони є те, що вона не перешкоджає руху підземного потоку. Це може бути сітка в потоці, крізь прозори якої рухається забруднена підземна вода і в цій зоні «зустрічає» нейтралізатор. Далі відбувається процес нейтралізації агресивної домішки. Іншим варіантом може бути перфорована труба.

Для планової задачі динаміки підземних вод процес фільтрації моделюємо таким рівнянням:

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

де  $h$  – глибина підземного потоку;  $k$  – коефіцієнт фільтрації;  $\mu$  – нестача насичення (водовіддача); « $+W$ » – інтенсивність інфільтрації; якщо « $-W$ » – інтенсивність відкачування води з водоносного шару;  $h_m$  – середня глибина підземного потоку.

Під час використання рівняння (1) водотрив вважаємо горизонтальним.

Компоненти вектора швидкості підземного потоку визначаємо на базі закону Дарсі:

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

Постановку крайових умов для рівняння (1) розглянуто в [3].

Якщо розглядати профільну фільтрацію, за умови, що коефіцієнт фільтрації – незмінна величина, рух сталий, то динаміку руху підземного потоку можна описати таким рівнянням:

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

Граничні умови для рівняння (3) розглянуто в [6, 9].

*Чисельні моделі динаміки підземних вод.* Для чисельного розв'язання моделювального рівняння (1) здійснюємо його розщеплення таким чином:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left( \frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = W. \quad (5)$$

Для чисельного інтегрування рівняння (5) використовуємо метод Ейлера. Розрахункова залежність має вигляд:

$$h^{n+1} = h^n + \frac{\Delta t}{\mu} W. \quad (6)$$

Для чисельного інтегрування рівняння (4) використовуємо прямокутну різницеву сітку [8]. Двокрокова схема розщеплення (метод сумарної апроксимації) має вигляд:

– перший крок:

$$\frac{h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \right. \\ \left. + a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (7)$$

– другий крок:

$$\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ a \frac{h_{i+1,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \right. \\ \left. + a \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right], \quad (8)$$

$$\text{де } a = \frac{kh_m}{\mu}.$$

Створено комп'ютерну програму для чисельного інтегрування рівняння (1), мова програмування FORTRAN. Програма побудована на модульному принципі, основні підпрограми типу SUBROUTINE такі:

- 1) WaA.DAT – файл початкових даних;
- 2) WaA11.for – чисельне інтегрування рівняння (5);
- 3) WaA21.for – чисельне інтегрування рівняння (4) на базі залежностей (7) та (8);

4) Wa2.for – розрахунок компонент вектора швидкості підземного потоку на базі залежностей (2).

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}.$$

Далі здійснюємо його розщеплення [8] на два рівняння (геометричне розщеплення):

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}; \quad (9)$$

$$\mu \frac{\partial k}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}. \quad (10)$$

На наступному етапі використовуємо такі різниці залежності (локально-одновимірна різницева схема):

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Розрахунок закінчуємо, коли виконуємо умову:

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

де  $\varepsilon = 0,01$ .

Створено комп'ютерну програму для чисельного інтегрування рівняння (3), мова програмування FORTRAN. Програма побудована на модульному принципі, основні підпрограми типу SUBROUTINE такі:

- 1) Wa37.DAT – файл початкових даних;
- 2) Wa12.for – чисельне інтегрування рівняння (3), перший крок розщеплення;
- 3) Wa13.for – чисельне інтегрування рівняння (3), другий крок розщеплення;
- 4) Wa2.for – розрахунок компонент вектора швидкості підземного потоку на базі залежностей (2).

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

*Модель геоміграції.* Для прогнозування забруднення підземних вод використовуємо таке рівняння геоміграції:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (11)$$

де  $u$ ,  $v$  – компоненти швидкості підземного потоку;  $C$  – концентрація домішки в підземному потоці;  $Q$  – інтенсивність емісії домішки в підземному потоці;  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  – коефіцієнти дисперсії;  $t$  – час.

Положення джерела емісії моделюємо за допомогою дельта – функції Дірака  $\delta(x-x_i)(y-y_i)$ , де  $x_i$ ,  $y_i$  – декартові координати джерела емісії. Постановку крайових умов для рівняння (3) розглянуто в [6]. Слід зазначити, що як початкові умови можна задавати форму зони забруднення, що утворилася, наприклад, у підземних водах під промисловим майданчиком, її розміри, концентрацію домішки в цій зоні.

Рівняння (11) також використовуємо для розрахунку руху нейтралізатора в потоці підземних вод.

Для розрахунку процесу нейтралізації домішки використовуємо стехіометричні співвідношення, що описують взаємодію «агресивна домішка + нейтралізатор».

Для чисельного розв'язку рівняння геоміграції здійснюємо його фізичне розщеплення :

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

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

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовуємо двоетапну різницеву схему:

– перший етап:

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

– другий етап:

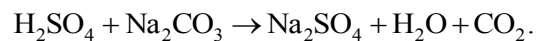
$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Для чисельного інтегрування першого рівняння з цієї системи (конвективний перенос домішки) використовуємо змінно-трикутну різницеву схему. Перерахунок концентрації домішки в кожній різницевої комірки проводимо на кожному часовому кроці на базі рівнянь кінетики.

Здійснено програмну реалізацію чисельного інтегрування рівняння геоміграції на базі схем розщеплення, розроблено комп'ютерну програму Wa3A.FOR.

## Результати

Далі наведено результати розв'язку задачі на базі розроблених чисельних моделей геоміграції. Постановка задачі: у ґрунтових водах утворилась зона забруднення, що містить  $H_2SO_4$ . Для нейтралізації використовуємо 10-відсотковий розчин  $Na_2CO_3$ . Реакція взаємодії «домішка + нейтралізатор» має вигляд:



Нейтралізатор подається в елемент, розташований у підземному водоносному шарі, що показано умовно стрілкою на рис. 2–4. Розглянуто такі сценарії:

1. Сценарій № 1: рух зони забруднення у підземному потоці (немає подачі нейтралізатора).

2. Сценарій № 2: рух зони забруднення в підземному потоці за наявності короткого нейтралізувального елемента.

3. Сценарій № 3: рух зони забруднення в підземному потоці за наявності довгого нейтралізувального елемента.

Концентрація домішки в зоні забруднення для часу  $t = 0$  становить 10 одиниць (у безрозмірному вигляді), час, що вказаний на рисунках, – безрозмірний.

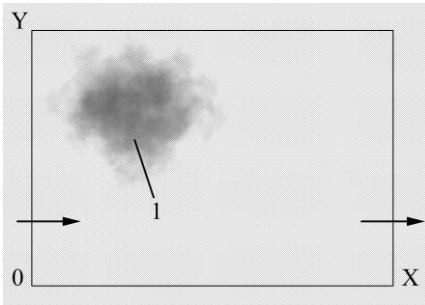


Рис. 2. Схема розрахункової зони (сценарій № 1, немає захисту підземних вод)

Fig. 2. Scheme of the calculation area (scenario No. 1, no groundwater protection)

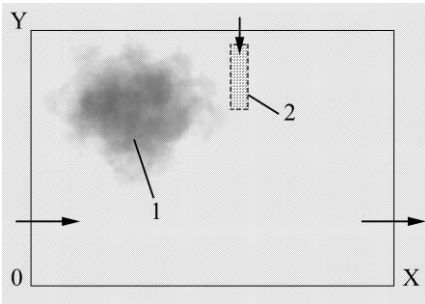


Рис. 3. Схема розрахункової зони (сценарій № 2, короткий нейтралізувальний елемент)

Fig. 3. Scheme of the design zone (scenario No. 2, short neutralizing element)

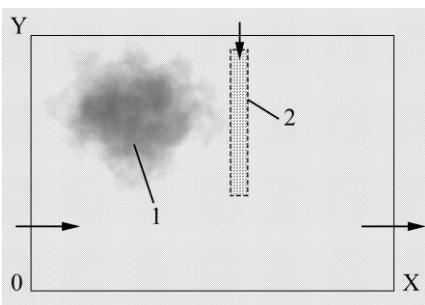


Рис. 4. Схема розрахункової зони (сценарій № 3, довгий нейтралізувальний елемент)

Fig. 4. Scheme of the design zone (scenario No. 3, long neutralizing element)

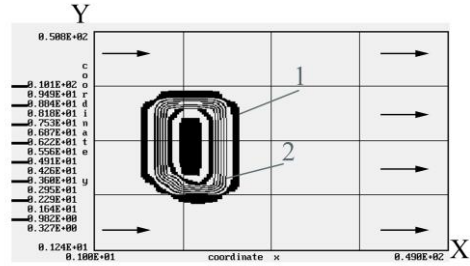


Рис. 5. Зона забруднення,  $t = 1$  (сценарій № 1):  
 $1 - C = 0,98$ ;  $2 - C = 2,29$

Fig. 5. Pollution zone,  $t = 1$  (scenario 1):  
 $1 - C = 0,98$ ;  $2 - C = 2,29$

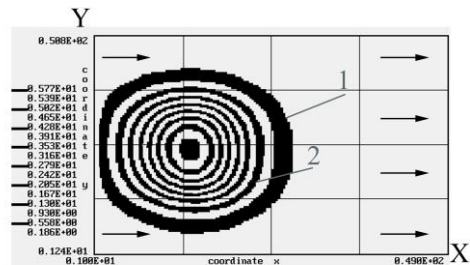


Рис. 6. Зона забруднення,  $t = 14$  (сценарій № 1):  
 $1 - C = 0,55$ ;  $2 - C = 1,30$

Fig. 6. Contamination zone,  $t = 14$  (scenario 1):  
 $1 - C = 0,55$ ;  $2 - C = 1,30$

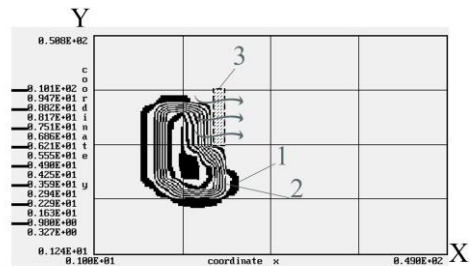


Рис. 7. Зона забруднення,  $t = 1$  (сценарій № 2):  
 $1 - C = 0,98$ ;  $2 - C = 2,29$ ;  
 $3 -$  нейтралізувальний елемент

Fig. 7. Contamination zone,  $t = 1$  (scenario 2):  
 $1 - C = 0,98$ ;  $2 - C = 2,29$ ;  $3 -$  neutralizing element

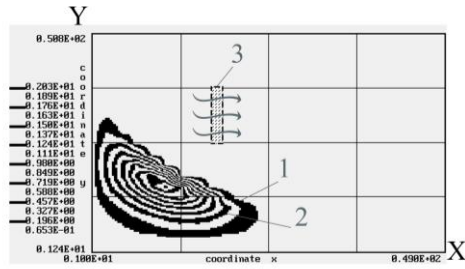


Рис. 8. Зона забруднення,  $t = 14$  (сценарій № 2):  
1 –  $C = 1,96$ ; 2 –  $C = 4,57$ ; 3 – нейтралізувальний елемент

Fig. 8. Contamination zone,  $t = 14$  (scenario 2):  
1 –  $C = 1.96$ ; 2 –  $C = 4.57$ ; 3 – neutralizing element

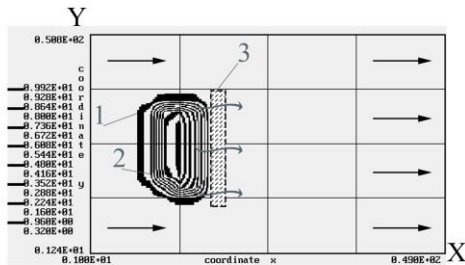


Рис. 9. Зона забруднення,  $t = 1$  (сценарій № 3):  
1 –  $C = 0,96$ ; 2 –  $C = 2,24$ ; 3 – нейтралізувальний елемент

Fig. 9. Contamination zone,  $t = 1$  (scenario 3):  
1 –  $C = 0.96$ ; 2 –  $C = 2.24$ ; 3 – neutralizing element

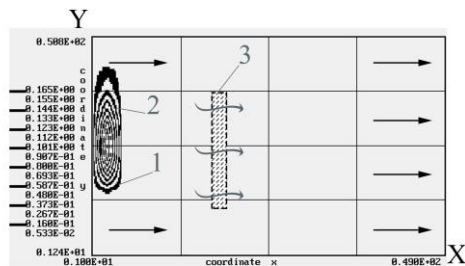


Рис. 10. Зона забруднення,  $t = 14$  (сценарій № 3):  
1 –  $C = 1,60$ ; 2 –  $C = 3,73$ ; 3 – нейтралізувальний елемент

Fig. 10. Contamination zone,  $t = 14$  (scenario 3):  
1 –  $C = 1.60$ ; 2 –  $C = 3.73$ ; 3 – neutralizing element

Результати обчислювального експерименту показують таке. По-перше, при відсутності системи захисту зона забруднення в підземному потоці з часом збільшується в розмірах та охоплює все більшу частину водоносного шару. По-друге, наявність нейтралізувального елемента

суттєво впливає на зміну розмірів зони забруднення – вона зменшується з часом. Крім цього, із наведених рисунків можна бачити, що в разі короткого нейтралізувального елемента частина зони забруднення «не потрапляє» до зони хімічної взаємодії, і ця зона забруднення має тенденцію до просування вздовж потоку нижче нейтралізатора. Отже, для організації такої системи захисту водоносного шару від забруднення важливо раціонально визначити довжину нейтралізувального елемента.

Відзначимо, що час розрахунку кожного варіанту задачі складає 3 с. Таким чином, побудовані чисельні моделі дозволяють швидко аналізувати зміну гідрогеологічного режиму та забруднення підземних вод. Це дуже корисно для проведення серійних розрахунків на практиці.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано ефективні чисельні моделі для експрес-оцінювання зміни динаміки ґрунтових вод та їх якості під дією техногенного джерела.

Побудовані чисельні моделі враховують комплекс важливих фізичних факторів, що впливають на процес геоміграції та процес нейтралізації домішки у підземному потоці. Це дає можливість отримувати адекватну оцінку ефективності методу нейтралізації агресивної домішки у водоносному шарі.

Створено комп'ютерний код, що дозволяє на практиці використовувати побудовані чисельні моделі.

### Висновки

1. Побудовано швидкозастосовну чисельну модель розрахунку динаміки ґрунтових вод. Модель також є платформою для розв'язання іншої важливої задачі – розрахунку процесів геоміграції.

2. Запропоновано чисельну модель розрахунку нестационарного процесу геоміграції. Модель дає можливість оцінювати не тільки процес формування зон забруднення в потоці ґрунтових вод, але і визначити ефективність методу нейтралізації домішки у підземному потоці.

3. Побудовані чисельні моделі враховують найбільш важливі параметри, що впливають на формування зон забруднення у ґрунтових водах.

4. Результати проведеного обчислювального експерименту показують, що побудовані математичні моделі дають можливість швидко отримати прогнознi дані для аналізу динаміки забруднення ґрунтових вод.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гурицький Д. С. Аналіз регіонального розвитку процесів підтоплення земель та їх вплив на природні ресурси України. *Геоінформатика*. 2013. № 1 (45). С. 85–89.
2. *ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016 Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення*. [Чинний від 2017-01-04]. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2017. 135 с.
3. Ковальчук П. І., Шевчук С. А. *Методика оцінки та прийняття рішень для захисту територій від підтоплення та затоплення*. Київ, 2010. 43 с.
4. Кремез В. С., Буц Ю. В., Цимбал В. А. Моделювання процесу підтоплення територій в зоні впливу водосховищ. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 1–2. С. 128–130.
5. Митрохін С. О. *Моделі та методи оптимального керування запобігання процесу підтоплення територій*: дис. ... канд. техн. наук. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка. Київ, 2011.
6. Рудаков Д. В. *Математичні методи в охороні підземних вод*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012. 158 с.
7. Щербак О. В., Яковлев Є. О., Долін В. В. Моделювання гідргеофільтраційного поля ґрунтових вод у зоні впливу металургійного виробництва. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 3. С. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.3.19-25>
8. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., ... Tatarko L. Development of a method for assessing air dustiness in the main fairing of the launch vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, No 1 (119). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013>
9. Cashman P. M., Preene M. *Groundwater Lowering in Construction. A Practical Guide to Dewatering*. CRC Press, 2012. 665 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003050025>
10. Guangwei Wu, Yulong Dong, Lei Liu, Yingqiang Yao, Yubai Bi, Jian Guo, Sha Gu. *Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW*. 2023. Vol. 43: Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII. P. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.3233/atde230795>
11. Harbaugh A. W. MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model—the ground-water flow process. *Techniques and Methods 6-A16*. 253 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6A16>

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, V. V. KOZACHYNA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics, water supply and physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup>Dep. «Hydraulics, water supply and physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail [tsurkanvaleri1997@gmail.com](mailto:tsurkanvaleri1997@gmail.com), ORCID 0000-0002-7433-7306

## Modeling of Non-Stationary Mass Transfer Process In Groundwater

**Purpose.** Infiltration of contaminated water and accidental spills of chemically hazardous substances into groundwater lead to the formation of large zones of man-made pollution in aquifers. Therefore, it is important to develop protection systems against groundwater pollution. To analyze the effectiveness of such protection systems at the design stage, it is necessary to have scientifically based information on the dynamics of changes in groundwater contamination zones. Such information can be obtained using the method of mathematical modeling. The study aims to create a numerical model for calculating the non-stationary process of geomigration when using chemical protection of groundwater from pollution. **Methodology.** To describe the dynamics of groundwater flows, two filtration equations are considered, which allow mathematical modeling of the filtration process both for solving planned problems

and for solving problems of specialized filtration. A two-dimensional geomigration equation was used to analyze changes in groundwater quality. This equation takes into account the convective transfer of impurities in the filtration flow, dispersion, and the intensity of impurity infiltration into the groundwater flow. This equation is also used to calculate the movement of the neutralizer in groundwater. The numerical integration of the filtration equation was performed using finite difference methods. An implicit splitting scheme was used to numerically integrate the geomigration equation. **Findings.** A fast-applicable numerical model for calculating groundwater dynamics has been built. The model is also a platform for solving another important task – the calculation of geomigration processes. A numerical model for calculating the unsteady-state geomigration process is proposed, which makes it possible to assess not only the process of formation of contamination zones in the groundwater flow, but also to determine the effectiveness of the method of neutralizing the impurities in the groundwater flow. **Originality.** Effective numerical models for rapid assessment of changes in groundwater dynamics and quality under the influence of anthropogenic sources have been developed. These models take into account a set of important physical factors that affect the process of geomigration and the process of neutralizing the impurity in the groundwater flow. **Practical value.** A computer program has been developed that allows determining the effectiveness of the process of neutralizing an aggressive impurity in groundwater by a computational experiment to protect it from anthropogenic pollution.

*Keywords:* groundwater dynamics; groundwater; mass transfer; mathematical modeling; anthropogenic pollution

## REFERENCES

1. Guritskiy, D. S. (2013). Analysis of regional development of flooded lands and their impact on the natural resources of Ukraine. *Geoinformatyka*, 1(45), 85-89. (in Ukrainian)
2. Nastanova shchodo inzhenerneho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia, 135 DSTU-N B V.1.1-38:2016. (2016). (in Ukrainian)
3. Kovalchuk, P. I., & Shevchuk, S. A. (2010). *Metodyka otsinky ta pryiniattia rishen dlia zakhystu terytorii vid pidtoplennia ta zatoplennia*. Kyiv. (in Ukrainian)
4. Kremez, V. S., Buts, Y. V., & Tsybal, V. A. (2012). The modelling of process of flooding by subsoil waters is in the affected of reservoirs zone. *Man and environment. Issues of neoecology*, 1-2, 128-130. (in Ukrainian)
5. Mytrokhin, S. O. (2011). Modeli ta metody optimalnogo keruvannia zapobihannia protsesu pidtoplennia terytorii. Taras Shevchenko Kyiv National University. Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian)
6. Rudakov, D. V. (2012). *Matematychni metody v okhoroni pidzemnykh vod*. Dnipropetrovsk: National Mining University. (in Ukrainian)
7. Shcherbak, O. V., Yakovlev, Ye. O., & Dolin, V. V. (2018). Modeling of hydrogeofiltration groundwater field in the influence zone of metallurgical production. *Mineral Resources of Ukraine*, 3, 19-25. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.3.19-25> (in Ukrainian)
8. Biliaiev, M., Biliaieva, V., Rusakova, T., Kozachyna, V., Berlov, O., Semenenko, P., ... & Tatarko, L. (2022). Development of a method for assessing air dustiness in the main fairing of the launch vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(119)), 17-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013> (in English)
9. Cashman, P. M., & Preene, M. (2020). *Groundwater Lowering in Construction. A Practical Guide to Dewatering*. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003050025> (in English)
10. Guangwei, Wu, Yulong, Dong, Lei, Liu, Yingqiang, Yao, Yubai, Bi, Jian, Guo, & Sha, Gu (2023). In *Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW* (Vol. 43: Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII, pp. 766774). DOI: <https://doi.org/10.3233/atde230795> (in English)
11. Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process. In *Techniques and Methods 6-A16*. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6a16> (in English)

Надійшла до редколегії: 20.02.24

Прийнята до друку: 24.06.2024

## УДК 504.5:551.577.13

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1</sup>, В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>2</sup>, В. В. БІЛЯЄВА<sup>3</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>4\*</sup>,  
О. В. ЗВОНАРЬОВА<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>3</sup>Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600 тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4\*</sup>Каф. «Охорони праці, цивільної та техногенної безпеки», Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 247 16 01, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

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

## Математичне моделювання процесу формування кислотних дощів у разі викидів із ТЕС

**Мета.** Відомо, що кислотні дощі негативно впливають на навколишнє середовище. Формування кислотних опадів в атмосфері відбувається внаслідок хімічної взаємодії продуктів горіння палива та атмосферної вологості. Кислотні дощі призводять до втрати врожаю, погіршення плодючості землі, закислення води у водоймах. Актуальною проблемою залишається розробка науково обґрунтованих методів дослідження інтенсивності такого кислотного забруднення атмосферного повітря та поверхні ґрунту в регіонах, де мають місце значні викиди від ТЕС. Для розв'язання цієї задачі важливо використовувати математичне моделювання, оскільки визначити експериментальним шляхом вплив викидів від ТЕС на формування кислотних дощів неможливо. Тому основною метою роботи є створення математичної моделі для прогнозування утворення кислотних дощів у разі викидів з ТЕС. **Методика.** Для прогнозування процесу формування кислотного дощу використано тривимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу забруднювача, що враховує профіль швидкості вітру, атмосферну стратифікацію, інтенсивність емісії домішки, напрям вітру. Це рівняння також використано для опису процесу перенесення водної пари в атмосферному повітрі. Щоб описати процес утворення кислоти в атмосферному повітрі, використано стехіометричне співвідношення. Чисельне інтегрування модельовального рівняння переносу здійснено за допомогою методу розщеплення. **Результати.** Побудовано багатофакторну чисельну модель, що дозволяє визначати зони, де формуються кислотні дощі. Розглянуто задачу прогнозування формування кислотного дощу в разі викидів від ТЕС на базі побудованої чисельної моделі. **Наукова новизна.** Запропоновано чисельну модель для прогнозування виникнення кислотного дощу внаслідок викидів із ТЕС. Модель є багатофакторною та враховує конвекцію, атмосферну дифузію, нерівномірний профіль вітру. Створено комп'ютерний код, що дозволяє оперативно оцінювати зони кислотного забруднення. **Практична значимість.** Розроблений комп'ютерний код для аналізу зон кислотного забруднення довкілля в разі промислових викидів дає можливість прогнозувати інтенсивність такого забруднення в різних метеоумовах.

**Ключові слова:** кислотний дощ; ТЕС; забруднення атмосфери; математичне моделювання; промислові викиди

### Вступ

Від середини ХХ ст. помітне значне випадання кислотних дощів та взагалі підвищення їх кислотності, що суттєво вплинуло на науковий інтерес до даної проблеми [3, 7–10, 13, 14]. В Україні кислотні дощі випадають часто, що обумовлено значним техногенним навантаженням регіонів. Це несе загрозу здоров'ю людини

та навколишньому середовищу. Кислотний дощ утворюється в результаті реакції між атмосферною водою і такими забруднювачами, як діоксид сірки (SO<sub>2</sub>) і різні оксиди азоту (NO<sub>x</sub>). Далі утворюються розчини кислот: сірчаної, сірчистої, азотистої й азотної. Джерелами кислотоутворювальних викидів є теплові електростанції, автотранспорт, металургійні і хімічні підприємства, авіація, тваринництво, спалювання

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

вугілля і деревини та ін. Також воєнні дії в Україні можуть спричинити генерацію кислотних дощів, якщо станеться влучання дронів чи ракет в об'єкти паливно-енергетичного комплексу чи інфраструктуру хімічної промисловості. Потім разом з атмосферними опадами розчини кислот випадають на землю, чим спричиняють значні ушкодження територій, сільгоспугідь та особливо можуть спричинити проблеми зі здоров'ям людей. Забруднення повітря діоксидом сірки та оксидами азоту може викликати респіраторні захворювання (астма, бронхіт, пневмонія та ін.) чи загострити їх.

Кислотні опади завдають шкоди лісам, оскільки розчиняють поживні речовини, такі як магній і кальцій, необхідні для здоров'я дерев. Крім того, кислотні дощі спричиняють виділення алюмінію в ґрунт, що ускладнює поглинання води деревами. Деревина, що росте у гірських районах на великій висоті, наприклад, ялинки, стають більш вразливими через вплив кислотних хмар і туману, які містять більше кислоти, ніж дощ або сніг. Кислотні хмари і туман позбавляють важливих поживних речовин листя та хвою, що призводить до розвитку інфекцій, комах та пошкодження від холодної погоди дерев і лісів.

Наслідки впливу кислотних опадів на рослинність включають: пошкодження листя та голок хвої; порушення процесів фотосинтезу; зниження стійкості до патогенних організмів; ослаблення та порушення росту рослин та ін.

Кислотні опади пошкоджують озера і струмки. До забруднення та кислотних дощів більшість водойм мала рівень *pH* близько 6,5. Проте кислотні дощі призвели до того, що багато озер і струмків мають значно нижчий рівень *pH*. Крім того, алюміній, який потрапляє в ґрунт, врешті надходить до водоймищ і може спричинити шкоду місцевій фауні.

Відомі наслідки впливу кислотних дощів на ґрунт: збільшення кислотності ґрунту; пошкодження кореневої системи рослин; порушення процесів усмоктування води та поживних речовин; вимивання мікроелементів та поживних речовин; пригнічення та загибель азотфіксуючих бактерій та ін. (рис. 1). Кислотні дощі завдають шкоди житловим і промисловим будівлям та об'єктам, пам'ятникам, архітектурним пам'яткам, автомобілям та ін. Хімічні сполуки, які містяться в кислотних дощах, можуть приз-

вести до відшарування фарби, а кам'яні структури можуть здатися старими та пошкодженими, що знижує їхню цінність і естетичний вигляд. Основною реакцією, що викликає руйнування мрамору та інших матеріалів, є утворення сульфатів на їхній поверхні.



Рис. 1. Наслідки кислотних дощів після хімічного викиду ([https://24tv.ua/pislya\\_himvikidu\\_v\\_krimu\\_proydu\\_t\\_ne\\_bezpechni\\_kislotni\\_doshhi\\_n1027257](https://24tv.ua/pislya_himvikidu_v_krimu_proydu_t_ne_bezpechni_kislotni_doshhi_n1027257))

Fig. 1. Consequences of acid rain after a chemical spill ([https://24tv.ua/pislya\\_himvikidu\\_v\\_krimu\\_proydu\\_t\\_ne\\_bezpechni\\_kislotni\\_doshhi\\_n1027257](https://24tv.ua/pislya_himvikidu_v_krimu_proydu_t_ne_bezpechni_kislotni_doshhi_n1027257))

Слід зазначити, що до числа потужних техногенних джерел, які сприяють формуванню кислотних дощів, належать ТЕС. Хімічні перетворення продуктів горіння органічного палива після потрапляння в атмосферне повітря вступають у реакцію з водяною парою та формують кислоти, що осідають на поверхню землі або вільну поверхню водойм. Інтенсивність викидів із ТЕС відома, але для оцінювання їх впливу на формування кислотних дощів, визначення масштабу саме такого забруднення довкілля потрібно мати науково обґрунтовані методи дослідження. У зв'язку з цим важливою є розробка методів оцінювання впливу викидів від промислових об'єктів на формування кислотних дощів та визначення масштабу такого специфічного забруднення довкілля. Зрозуміло, що для розв'язання цієї важливої задачі потрібно мати математичні моделі, бо експериментальним шляхом визначити вплив підприємств на формування кислотних дощів неможливо. Для рішення даної проблеми має сенс використання моделі Гауса, аналітичних моделей або чисельних моделей [1, 4, 6, 11, 12]:

### Мета

Робота спрямована на створення математичної моделі для прогнозування процесу утворення кислотних дощів у разі викидів із ТЕС (рис.2).



Рис. 2. Викиди від Придніпровської ТЕС  
(<https://cutt.ly/eJMj7Ag>)

Fig. 2. Emissions from Prydniprovska TPP  
(<https://cutt.ly/eJMj7Ag>)

### Методика

Розглянемо процес формування кислотного дощу в разі викиду продуктів горіння від труб Придніпровської ТЕС (рис. 2).

Для оцінювання впливу викидів із ТЕС на формування кислотних дощів потрібно мати інформацію:

- 1) про просторовий розподіл концентрації домішки в атмосферному повітрі, яка є «ядром» процесу утворення кислот;
- 2) про розподіл вологи в атмосферному повітрі;
- 3) про механізм хімічного формування кислоти внаслідок взаємодії «домішка – волога».

Для моделювання поширення домішки ( $\text{NO}_2$ ) в атмосферному повітрі (викид із ТЕС) використовуємо 3D-рівняння масопереносу [1, 2, 4, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i). \end{aligned} \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація  $\text{NO}_2$  в повітрі;  $u, v, w$  – компоненти вектора швидкості вітру;  $Q$  – інтенсивність викиду  $\text{NO}_2$  від ТЕС;  $\mu_x, \mu_y, \mu_z$  – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;  $t$  – час.

Положення джерела емісії (труби ТЕС) моделюємо за допомогою дельта-функції Дірака:

$$\delta(x - x_i), \delta(y - y_i), \delta(z - z_i),$$

де  $x_i, y_i, z_i$  – декартові координати джерела викиду (труби).

Постановку крайових умов для рівняння (1) розглянуто в [2, 5]. Відзначимо, що на межі, де потік входить до розрахункової зони, ставлять граничну умову  $C = 0$ . Для початкового моменту  $t = 0$  беремо  $C = 0$ .

Для моделювання перенесення водяної пари в атмосферному повітрі також використовуємо рівняння масопереносу, що має такий вигляд [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $S$  – концентрація водяної пари в атмосферному повітрі; значення інших параметрів такі самі, що і для рівняння (1). На межі, де потік входить до розрахункової зони, ставимо граничну умову  $S = S_0$ , де  $S_0$  – фонові концентрація водяної пари в атмосферному повітрі. Для моменту  $t = 0$  беремо  $S = 0$ . Рівняння (2) збігається за виглядом із рівнянням (1), але в рівнянні (2) немає джерела емісії водяної пари.

У разі практичного використання рівнянь масопереносу (1) та (2) враховують нерівномірний профіль швидкості вітру, а саме: на вході до розрахункової зони профіль швидкості вітру визначають за моделлю Швець – Юдіна :

$$u = u_1 \left( \frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}} \right),$$

де  $u_1$  – швидкість вітру на висоті  $z_1$ ;  $z_0$  – шорсткість.

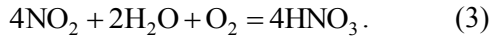
Коефіцієнти атмосферної дифузії визначаємо так :

$$\mu_z = k_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^m;$$

$$\mu_x = k_0 \cdot u; \quad \mu_y = k_0 \cdot v,$$

де  $k_0 = 0,1$ ;  $k_1 = 0,2$ .

Процес формування кислотних опадів визначаємо на базі наступного рівняння :



Отже, алгоритм розв'язання задачі полягає в такому :

1. Чисельно розв'язуємо рівняння (1) та визначаємо концентрацію  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі для часу  $t$ .

2. Чисельно розв'язуємо рівняння (2) та визначаємо концентрацію водяної пари в атмосферному повітрі для часу  $t$ .

3. Здійснюємо розрахунок концентрації азотної кислоти на базі рівняння (3).

4. Визначаємо зміну концентрації  $\text{NO}_2$ , водяної пари в розрахунковій зоні для нового часу.

*Чисельна модель.* Для чисельного розв'язування рівнянь масопереносу (1) та (2) використовуємо скінченнорізницеві схеми. Для чисельного інтегрування рівняння (1) здійснюємо таке його геометричне розщеплення:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C &= \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (4) \end{aligned}$$

Під час побудови чисельної моделі тут і далі будемо використовувати позначку  $w = w - w_g$ .

Виконаємо такі перетворення:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \\ \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}; \\ \frac{\partial wC}{\partial z} &= \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}; \\ \frac{\partial wC}{\partial z} &= \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}, \end{aligned}$$

де використано такі позначення:

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; \\ v^+ &= \frac{v + |v|}{2}; v^- = \frac{v - |v|}{2}; \\ w^+ &= \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}. \end{aligned}$$

Здійснимо апроксимацію похідних за формулами :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} - \\ &- \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Для першого рівняння масопереносу скінченнорізницеву схему записуємо так :

– крок 1:

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

– крок 2:

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

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Скінченнорізницеву схему для другого рівняння масопереносу записуємо таким чином:

– крок 1:

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

– крок 2:

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

Скінченнорізницеву схему для третього рівняння масопереносу запишемо так:

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_z^+ C^k = M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n;$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_z^- C^{n+1} = M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^{n+1}.$$

Для інтегрування останнього рівняння із (3) використовуємо метод Ейлера. Розрахункова залежність має вигляд :

$$C^{n+1} = C^n - dt \cdot \sigma C + dt \cdot \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i(t)).$$

Аналогічно будуємо різницеву схему для чисельного інтегрування рівняння (2).

Розроблено комп'ютерну програму, що реалізує розглянуті дискретні рівняння.

### Результати

Далі наведено результати математичного моделювання зони кислотного забруднення повітря в разі емісії  $\text{NO}_2$  на Придніпровській ТЕС.

Розрахункова зона показана на рис. 3. Для проведення розрахунків взято : швидкість вітру на висоті 10 м – 3 м/с (рис. 4) та 7 м/с (рис. 5); швидкість гравітаційного осадження крапель кислоти, що утворюються в атмосферному повітрі, – 0,003 м/с; концентрація водяної пари в атмосфері 11 мг/м<sup>3</sup> ; m = 1.

Розглянуто різний напрям вітру: східний та західний. У разі західного вітру має місце рух домішки в напрямі житлового масиву Перемога, у разі східного вітру – в приміському на-

прямі м. Дніпро. Інтенсивність викиду домішки на ТЕС взято з відкритих джерел.

Далі на рисунках показано зону кислотного забруднення повітря для розглянутих сценаріїв.

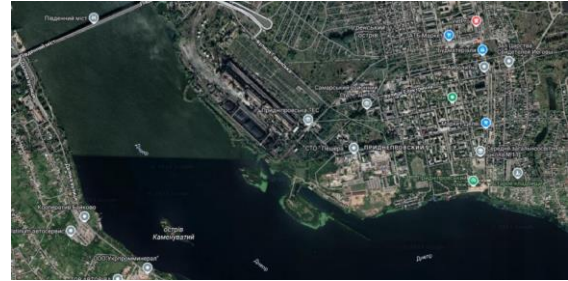


Рис. 3. Розрахункова зона (Google Image 2024)

Fig. 3. Computational area (Google Image 2024)



Рис. 4. Ізолінії концентрації азотної кислоти, рівень  $z = 25$  м:

$$1 - C = 0,82 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0,61 \text{ мг/м}^3, \\ 3 - C = 0,22 \text{ мг/м}^3$$

Fig. 4. Isolines of nitric acid concentration, level  $z = 25$  m:

$$1 - C = 0,82 \text{ mg/m}^3; 2 - C = 0,61 \text{ mg/m}^3, \\ 3 - C = 0,22 \text{ mg/m}^3$$



Рис. 5. Ізолінії концентрації азотної кислоти, рівень  $z = 10$  м:

$$1 - C = 0,54 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0,28 \text{ мг/м}^3, \\ 3 - C = 0,11 \text{ мг/м}^3$$

Fig. 5. Isolines of nitric acid concentration, level  $z = 10$  m:

$$1 - C = 0,54 \text{ mg/m}^3; 2 - C = 0,28 \text{ mg/m}^3, \\ 3 - C = 0,11 \text{ mg/m}^3$$

Як можемо бачити з рис. 4, зона кислотного забруднення має форму шлейфа, що напрямлений у напрямі руху повітряних мас. Формування такого шлейфу призводить до закислення поверхні землі на присадибних ділянках. Аналіз зони кислотного забруднення, що наведений на рис. 5, показує, що значному кислотному забрудненню піддається акваторія р. Дніпро, унаслідок чого слід очікувати додаткового техногенного забруднення водного середовища.

Відзначимо, що час розрахунку кожного варіанту задачі складає 4 с. Таким чином, побудована математична модель дозволяє в рамках одного комп'ютерного коду швидко розраховувати форму та інтенсивність зон кислотного забруднення, що формуються в атмосферному повітрі для різних метеоумов.

#### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано чисельну модель для прогнозування виникнення кислотного дощу внаслідок викидів із ТЕС. Модель є багатофактор-

ною та враховує конвекцію, атмосферну дифузію, нерівномірний профіль вітру, хімічне перетворення домішки. Створено комп'ютерний код, що дозволяє оперативно оцінювати зони кислотного забруднення.

#### Висновки

1. Побудовано багатофакторну чисельну модель, що дозволяє визначати зони, де формуються кислотні дощі внаслідок викидів із ТЕС.

2. Запропонована чисельна модель дає можливість розв'язувати задачі оцінки впливу на довкілля (ОВНД) на новому якісному рівні: визначати не тільки зони «впливу» ТЕС на забруднення довкілля, але і зони кислотного забруднення, чого не дозволяють зробити наявні моделі, які використовують на практиці.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берлянд М. Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Нічук Н. В. Аналіз поширення кислотних опадів в Україні. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ* (Вінниця, 27–28 квітня 2020). *Вінницький національний технічний університет*. Вінниця, 2020. С. 1–3.
4. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.
5. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. *Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях*. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
6. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
7. Acid rain. *New World Encyclopedia*. 2012. URL: [http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Acid\\_rain](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Acid_rain)
8. 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*. 2012. P. 87–91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
9. Butler Th. J., Likens G. E. Acid rain. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/acid-rain>
10. Hunt P. Putting Asian acid rain on the map. *New Scientist*. 1992. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg13618510-700-putting-asian-acid-rain-on-the-map/>
11. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16, No 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
12. Lacombe J.-M., Truchot D., Duplantier S., Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (Bologna, 9-12 Oct. 2017). Bologna, 2017. P. 1–5.

13. Sivaramanan S. *Acid rain, causes, effects and control strategies*. 2015.  
URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/275344491\\_ACID\\_RAIN\\_CAUSES\\_EFFECTS\\_AND\\_CONTROL\\_STRATEGIES](https://www.researchgate.net/publication/275344491_ACID_RAIN_CAUSES_EFFECTS_AND_CONTROL_STRATEGIES)
14. Verma A., Tewari A., Azami A. An impact of simulated acid rain level on different pH-levels on some major vegetable plants in India. *Reports and opinion*. 2010. Vol. 2 (4). P. 38–40.

M. M. BILIAIEV<sup>1</sup>, V. D. PETRENKO<sup>2</sup>, V. V. BILIAIEVA<sup>3</sup>, O. V. BERLOV<sup>4\*</sup>,  
O. V. ZVONAROVA<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Dep. «Transportation Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail petrenko.dii@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>3</sup>Dep. Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4\*</sup>Dep. «Labor Protection, Civil and Technogenic Safety», Ukrainian State University of Science and Technologies, Architect Oleg Petrov St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

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

## Mathematical Modeling of the Process of Acid Rain Formation in Case of Emissions from Thermal Power Plants

**Purpose.** It is known that acid rain has a negative impact on the environment. The formation of acid precipitation in the atmosphere occurs as a result of the chemical interaction of fuel combustion products and atmospheric humidity. Acid rain leads to crop losses, deterioration of soil fertility, and acidification of water in reservoirs. The development of scientifically based methods for studying the intensity of such acidic pollution of the air and soil surface in regions with significant emissions from thermal power plants remains an urgent problem. To solve this problem, it is important to use mathematical modeling, since it is impossible to determine the impact of emissions from thermal power plants on the formation of acid rain experimentally. Therefore, the main goal of the work is to create a mathematical model for predicting the formation of acid rain in the event of emissions from thermal power plants. **Methodology.** To predict the process of acid rain formation, a three-dimensional equation of convective diffusion transport of a pollutant is used, which takes into account the wind speed profile, atmospheric stratification, emission intensity of an impurity, and wind direction. This equation is also used to describe the process of water vapor transport in atmospheric air. To describe the process of acid formation in atmospheric air, a stoichiometric relationship is used. The numerical integration of the modeling equation of transfer was carried out using the splitting method. **Findings.** A multifactorial numerical model was built that allows determining the zones where acid rain is formed. The problem of predicting the formation of acid rain in the case of emissions from thermal power plants on the basis of the constructed numerical model is considered. **Originality.** A numerical model is proposed to predict the occurrence of acid rain due to emissions from thermal power plants. The model is multifactorial and takes into account convection, atmospheric diffusion, and an uneven wind profile. A computer code has been created that allows for rapid assessment of acid pollution zones. **Practical value.** The developed computer code for analyzing the zones of acidic pollution of the environment in the case of industrial emissions makes it possible to predict the intensity of such pollution in various meteorological conditions.

**Keywords:** acid rain; thermal power plants; air pollution; mathematical modeling; industrial emissions

### REFERENCES

1. Berlyand, M. E. (1985). *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian)
2. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)

3. Nichuk, N. V. (2020). Analiz poshyrennia kyslotnykh opadiv v Ukraini. In *Materialy XLIX naukovo-tekhnichnoi konfere-ntsii pidrozdiliv VNTU* (pp. 1-3). Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa, Ukraine. (in Ukrainian)
4. Plyatsuk, L. D., & Boyko, V. V. (2010). The analysis of mathematical modeling methods of pollutants diffusion in the atmosphere. *Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky Kyiv National University*, 6, 1-4. (in Ukrainian)
5. Pshinko, A. N., Belyayev, N. N., & Mashihina, P. B. (2011). *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennykh avariyah*. Dnepropetrovsk: Nova ideologiya. (in Russian)
6. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka. (in Russian)
7. Acid rain. (2012). *New World Encyclopedia*. Retrieved from [http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Acid\\_rain](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Acid_rain) (in English)
8. Biliaiev, M., & Kharytonov, M. M. (2012). 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](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15) (in English)
9. Butler, Th. J., & Likens, G. E. Acid rain. *Encyclopedia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/acid-rain> (in English)
10. Hunt, P. (1992). Putting Asian acid rain on the map. *New Scientist*. Retrieved from <https://www.newscientist.com/article/mg13618510-700-putting-asian-acid-rain-on-the-map/> (in English)
11. 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)
12. Lacombe, J. M., Truchot, D., & Duplantier, S. (2017). Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. In *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (pp. 1-5). Bologna, Italy. (in English)
13. Sivaramanan, S. (2015). *Acid rain, causes, effects and control strategies*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/275344491\\_ACID\\_RAIN\\_CAUSES\\_EFFECTS\\_AND\\_CONTROL\\_STRATEGIES](https://www.researchgate.net/publication/275344491_ACID_RAIN_CAUSES_EFFECTS_AND_CONTROL_STRATEGIES) (in English)
14. Verma, A., Tewari, A., & Azami, A. (2010). An impact of simulated acid rain level on different pH-levels on some major vegetable plants in India. *Reports and opinion*, 2(4), 38-40. (in English)

Надійшла до редколегії: 01.02.2024

Прийнята до друку: 03.06.2024

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 629.3:004.415.3

Я. Д. ОСТАПЕЦЬ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта oyar@i.ua, ORCID 0000-0003-1976-5188

## Експериментальна оцінка ефективності використання візуальних міток для керування безпілотними транспортними засобами

**Мета.** Дослідження спрямовано на експериментальну оцінку ефективності використання візуальних міток, а саме маркерів ARToolKitPlus, ArUco і двовимірних кодів типу QR (quick response code) у задачах локалізації безпілотних транспортних засобів (БТЗ) всередині приміщень. **Методика.** Для можливості реалізації процесів локалізації та сприйняття безпілотних транспортних засобів на основі візуальних міток (маркерів) розроблено структуру підсистеми обробки візуальних міток. Запропоновано алгоритм сумісного використання візуальних міток трьох типів – маркерів ARToolKitPlus, ArUco і кодів QR – для локалізації безпілотних транспортних засобів та ідентифікації вантажу на прикладі сценарію роботи складу інтернет-магазину. Для проведення експериментів над маркерами обрано такий апаратно-програмний засіб, як «розумна» камера машинного зору JeVois–A33 з програмним модулем JeVois Markers Combo та графічним інтерфейсом JeVois Inventor. **Результати.** Проведено експериментальне дослідження можливості коректного розпізнавання візуальних міток для умов роботи в приміщеннях. У результаті серії експериментів визначено можливості коректного розпізнавання візуальних міток типу маркерів ArUco, ARToolKitPlus та кодів QR під час сканування під прямим кутом відносно камери на відстані в діапазоні від 0,3 до 2 метрів. **Наукова новизна.** У дослідженні отримано значення ймовірностей коректного розпізнавання маркерів ArUco, ARToolKitPlus та двовимірних кодів QR в умовах локалізації безпілотних транспортних засобів усередині приміщень. **Практична значимість.** Отримані результати дослідження можна застосовувати під час створення, імітаційного моделювання та аналізу ефективності алгоритмів локалізації та сприйняття безпілотних транспортних засобів усередині приміщень із використанням відповідних візуальних міток (маркерів). Запропонована узагальнена структура підсистеми обробки візуальних міток системи локалізації та сприйняття може бути використана під час розробки систем керування безпілотними транспортними засобами.

**Ключові слова:** безпілотний транспортний засіб (БТЗ); локалізація; фідуціарний маркер; візуальна мітка; ArUco; ARToolKitPlus; QR-код; камера машинного зору JeVois–A33

### Вступ

Одним із популярних і достатньо ефективних у певних умовах методів локалізації безпілотних транспортних засобів (БТЗ) та ідентифікації вантажів є використання фідуціарних маркерів (fiducial marker). Кожному маркеру властивий унікальний набір характеристик, які дозволяють однозначно ідентифікувати його в просторі серед інших об'єктів і подібних маркерів [1]. Однозначність визначає комбінація форм, кольо-

рів, кодів тощо [7, 8]. Система на базі фідуціарних маркерів повинна працювати на різних відстанях, мітку має бути добре видно як із близької відстані, так і з далекої, тож високий показник масштабування є головною вимогою до мітки. Також маркери мають бути стійкими до впливів зовнішніх факторів, таких як забруднення, зміна освітлення або фізичне пошкодження маркера. Процес локалізації з використанням фідуціарних маркерів передбачає зйомку зображення зовнішньої обстановки

---

**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

---

на камеру, розпізнавання наявних маркерів за допомогою комп'ютерного зору й обчислення точного положення засобу в просторі за допомогою математичних алгоритмів [1, 6]. Маркерна локалізація особливо ефективна в сценаріях застосування БТЗ для складських робіт, де точність локалізації відіграє важливу роль в успішному виконанні завдань.

У роботі [4] представлена система фідуціарних маркерів ArUco із можливістю налаштування словників маркерів. Проведені експерименти над маркерами ArUco показують більшу стійкість до хибних результатів порівняно з іншими системами, що забезпечено ефективним вирішенням проблеми оклюзії [4]. У [5] запропоновано методи генерування словників фідуціарних маркерів, засновані на змішано-цілочисловому лінійному програмуванні (MILP). За результатами експериментів, згенеровані словники перевершують за показником міжмаркерної відстані словники ARToolKitPlus і AprilTags.

У статті [3] подано оцінку ефективності маркерів у підводному середовищі для систем маркерів ARToolKit, AprilTags та ArUco за шістьма критеріями: продуктивність за різного освітлення та рівня каламутності, мінімально необхідний показник розміру для виявлення (у пікселях), максимальна відстань між камерою та маркером (у метрах), максимальний кут для успішного виявлення та необхідний час обробки. У [9] досліджено ефективність рішення для виявлення деформацій у сфері геодезії на основі зображень із камер та маркерів ArUco. У [10] проведено порівняння стійкості маркерів AprilTag та ArUco щодо опору обертанню за наявності синтетичного шуму оптичного датчика. При цьому виключені умови зовнішнього середовища, що впливають на продуктивність алгоритмів.

Система маркерів STag, запропонована в [4], спроектована так, щоб бути стійкою до факторів тремтіння, тому зберігає стабільність положення краще за аналогічні рішення. Це досягається за рахунок використання геометричних особливостей, які можна локалізувати з більшою повторюваністю. У роботі [2] проведено порівняння систем маркерів ARToolKitPlus, ArUco і RENE–Tag.

Оцінку сильних та слабких сторін візуального відстеження за системами маркерів ARToolKit, HOM, IGD і SCR проведено в [11]. Критеріями оцінки виступили: зручність використання, ефективність (час роботи для виявлення та розпізнавання маркерів), точність (помилка визначення положення маркера), надійність (широкі кути, велика кількість маркерів, віддалені маркери, погане фокусування).

У роботі [1] розглянуто можливість використання візуальних міток для управління невеликим БТЗ всередині приміщення для переміщення вантажів. Завданням такого БТЗ є переміщення заданого вантажу на складі з одного стелажа на інший або з полиці стелажа до кліті для подальшого відправлення. Описано три типи візуальних міток, які використовують у задачах локалізації БТЗ й ідентифікації вантажів: фідуціарні маркери ArUco та ARToolKitPlus, а також QR–коди (quick response code).

Щоб реалізувати локалізацію та сприйняття БТЗ, необхідно визначити можливість коректного розпізнавання для вказаних типів міток у різних умовах (освітлення, кут розташування, відстань до камери і т. ін.).

### **Мета**

Основною метою дослідження є оцінка ефективності використання візуальних міток типу ARToolKitPlus, ArUco і QR–коду в задачах локалізації безпілотних транспортних засобів. Відповідно до мети поставлено такі завдання: аналіз та розробка сценарію (алгоритму) використання візуальних міток ARToolKitPlus, ArUco і QR–кодів для локалізації БТЗ та ідентифікації вантажу; розробка структури підсистеми обробки візуальних міток; вибір апаратно-програмних засобів для проведення експериментів; експериментальне дослідження можливості коректного розпізнавання візуальних міток.

### **Методика**

Ця стаття відображає хід дослідження та результати дипломної роботи автора [1]. За основу взято сценарій роботи складу інтернет-магазину, де товари упаковані в коробки для подальшого відправлення клієнтам. Як було описано в [1], маркери ArUco застосовують для локалізації

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

БТЗ у просторі; маркери ARToolKitPlus ідентифікують код вантажу, який перевозять; QR-коди надають додаткову інформацію про вантаж, розширюючи базові дані. QR-код, прикріплений до кожної коробки, містить детальну інформацію про її вміст, що дозволяє ефективно відстежувати кожен товар на складі, мінімізувати помилки в підготовці замовлень та спростити інвентаризацію.

QR-код може містити відповідні інструкції та попередження з урахуванням особливих умов доставки. Це забезпечує правильне поводження з вантажем відповідно до його характеристик у разі доставки чутливих крихких товарів або дотримання температурних вимог для певних товарів (наприклад, продукти харчування чи медичні препарати).

Вага вантажу, вказана у QR-коді, корисна для оптимізації розподілу товарів між різними БТЗ з огляду на вагові обмеження.

Ціль доставки, зазначена в QR-коді, може містити не тільки інформацію про кінцевий пункт, а й терміновість відправлення. Інформація з QR-коду про статус готовності коробки до відправлення повідомляє, що товар упакований, перевірений та готовий до доставки. Ці дані полегшують планування маршрутів та управління термінами доставки.

Таким чином, використання комбінації маркерів ARUco, ARToolKitPlus і QR-кодів дає можливість системі керування отримати детальну інформацію про положення БТЗ в складському приміщенні, ідентифікацію вантажу та додаткові параметри, що в сукупності дозволяє успішно використовувати БТЗ для переміщення вантажів.

Таке рішення може знайти застосування в різних сферах, особливо на складах транспортних компаній, поштових служб та інтернет-магазинів. Ці підприємства стикаються з необхідністю швидкого переміщення вантажів і точної ідентифікації товарів для їх сортування, що вкрай необхідно для рентабельного управління логістикою.

Для реалізації процесів локалізації та сприйняття БТЗ на основі візуальних міток (маркерів) розроблено структуру, що зображена на рис. 1. Пунктирною лінією на схемі відділено внутрішні блоки системи від зовнішніх джерел надхо-

дження інформації, а також блока обробки результатів. Передбачено, що внутрішні блоки – це програмні блоки коду з окремих бібліотек.

Процес розпізнавання квадратних маркерів можна розбити на два основні етапи. Спершу проводять пошук кандидатів, що передбачає виявлення на зображенні камери всіх квадратних форм, які могли б потенційно бути маркерами. Кандидатів, схожих на маркери, допускають до другого етапу.

На другому етапі відбувається ідентифікація: аналіз бітового кодування всередині виявлених кандидатів, установлення, чи є кандидати маркерами, а також перевірка, чи належать вони до заданого словника.

Після розпізнання маркера для кодування номера вантажу (ARToolKitPlus) отриманий ідентифікаційний номер маркера потрапляє безпосередньо до блока обробки даних, а маркери локалізації (ARUco) потребують додаткової програмної обробки.

Зазначимо, що в процесі локалізації, щоб забезпечити точну відповідність між положенням маркера в реальному світі та відображенням пікселів цього маркера, необхідно коригувати отримане камерою зображення шляхом калібрування. Саме калібрування камери є критично важливим для точного перетворення двовимірних зображень у тривимірний простір.

Калібрування камери – це визначення її внутрішніх параметрів, які описують внутрішню геометрію процесу захоплення зображення. До таких параметрів належать: фокусна відстань, коефіцієнт спотворення лінзи, параметри перетворення пікселів тощо. Ці параметри залежать від моделі камери. Налаштування камери здійснюють один раз за допомогою спеціальних допоміжних інструментів, а параметри налаштування зберігають у спеціальному файлі з конфігураційними даними, що продемонстровано на схемі (див. рис. 1).

Після того як маркер ідентифіковано, у блоці обробки мітки відбувається аналіз форми отриманого контуру маркера. Алгоритми цього блока вилучають значущі точки з форми зображення маркера. Під значущими точками мають на увазі такі параметри маркера, як координати кутів, координати центра, довжину сторін тощо [1].

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

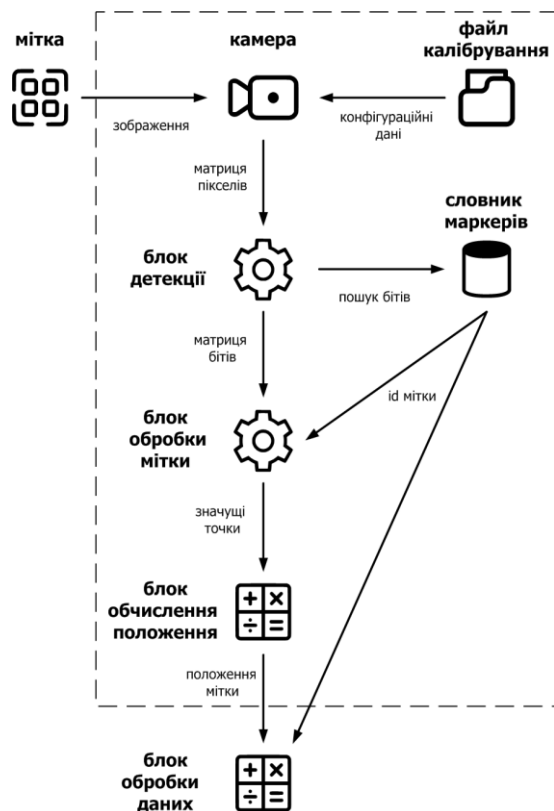


Рис. 1. Структура підсистеми обробки візуальних міток

Fig. 1. The structure of the visual tag processing subsystem

На основі значущих точок та конфігурації маркера блок обчислення положення математично вираховує орієнтацію та положення мітки відносно камери у тривимірному просторі. Після завершення цього процесу отримуємо готові до обробки дані.

Для проведення експериментів над маркерами було обрано «розумну» камеру машинного зору JeVois–A33 з програмним модулем JeVois Markers Combo та графічним інтерфейсом JeVois Inventor, оскільки вона задовольняє основні потреби для роботи з фізичними маркерами. Платформа JeVois надає широкий вибір програмних модулів комп'ютерного зору, серед яких і модулі для розпізнавання візуальних міток. Крім того, доступне середовище розробки для написання модулів мовою Python на основі бібліотеки OpenCV. Камера підтримує різні режими роботи та відеоформати, що забезпечує гнучкість під час налаштування та проведення експериментів [1].

## Результати

Визначимо експериментальним шляхом можливість коректного розпізнавання для обраних раніше типів міток за допомогою камери залежно від освітлення, кута розташування, відстані до камери та інших параметрів.

Для експериментів обрано словники маркерів із мінімально можливими розмірностями, а саме 4 x 4 для ArUco та 3 x 3 для ARToolKitPlus. Таке рішення пов'язано зі складністю виявлення та розпізнавання маркерів в умовах малих габаритів вантажу, де необхідні, відповідно, малі розміри маркерів для позначення цих вантажів. Чим більше елементів міститься на маркері, тим вимогливіша система до зовнішніх умов, у першу чергу це стосується роздільної здатності камери.

Діапазон значень словника ArUco 4 x 4 становить від 0 до 49 (50 штук), а для словника ARToolKitPlus 3 x 3 – від 0 до 31 (32 штуки).

Приклад результату розпізнавання маркера ArUco 4 x 4 камерою наведено на рис. 2 [1].

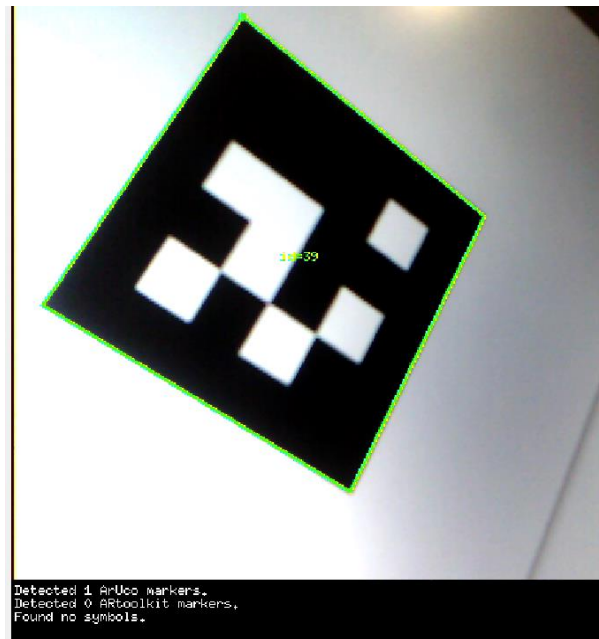


Рис. 2. Приклад експерименту з міткою ArUco

Fig. 2. The ArUco tag experiment example

Для локалізації відносно міток ArUco модуль Markers Combo відновлює повне тривимірне розташування відповідно до відомого фізичного

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

розміру цих маркерів, за умови встановлення розмірності маркера в міліметрах усередині вкладки налаштування параметрів.

Після обробки кожного відеокадру в консоль надходять повідомлення про місцезнаходження всіх ідентифікованих міток.

Будемо вважати, що дані позиціонування маркерів ArUco надходять до системи керування БТЗ правильно в усіх випадках за умови правильної ідентифікації цих маркерів.

Приклад результату розпізнавання маркера ARToolKitPlus 3 x 3 наведено на рис. 3.



Рис. 3. Приклад експерименту з міткою ARToolKitPlus

Fig. 3. The ARToolKitPlus tag experiment example

Для міток ARToolKitPlus передбачена можливість налаштування параметра мінімального порогу достовірності ідентифікації маркера, який також впливає на швидкість розпізнавання та рівень споживання обчислювальних ресурсів. Параметр установлюють у діапазоні дійсного числа від 0 до 1, за замовчуванням параметр встановлено у значенні 0,7.

У випадку встановленого за замовчуванням граничного значення достовірності маркерів ARToolKitPlus часто виникали ситуації помилкового розпізнавання міток, навіть із мітками різної розмірності. Виявилось, що маркери в цих ситуаціях були схожі один на одного. Імовірно, алгоритм програми вважав помилково визначені маркери дійсно пошкодженими, а після відновлення зображення знаходив відповідності зі схожим маркером у словнику. Причому іноді один маркер був розпізнаний одразу як два маркери з різних словників, приклад таких маркерів наведено на рис. 4 [1].



Рис. 4. Схожі між собою маркери у словниках різних систем:  
а – ArUco 4 x 4 з id=14; б – ARToolKitPlus 3 x 3 з id=17

Fig. 4. Similar markers in the dictionaries of different systems:

а – ArUco 4 x 4 з id=14; б – ARToolKitPlus 3 x 3 з id=17

У разі встановлення граничної достовірності зі значенням 1 ситуація з розпізнаванням значно поліпшилася, випадків з одночасним розпізнаванням одного маркера як двох не виникало.

Подальші експерименти проведено для максимального порогу достовірності, що дорівнює 1, оскільки для цієї роботи пріоритетна надійність ідентифікації маркерів.

Як видно з рис. 5, закодоване в QR-коді текстове повідомлення «Experimental test message 1» одразу виводиться на екран середовища.

Крім того, проведено експерименти з розпізнавання комбінацій із різних типів міток у разі їх одночасного потрапляння в поле зору камери, приклад продемонстровано на рис. 6.

Також проведено експерименти з великою кількістю міток у полі зору камери, що може вплинути на продуктивність обробки міток, один із таких експериментів зображено на рис. 7.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

За даними, наведеними на знімку екрана (див. рис. 7), можна побачити, що навантаження процесора камери (CPU) склало 262 %. Такий результат отримано, оскільки процесор містить 4 ядра, на кожному з яких відбувається підрахування окремого ступеня завантаженості в межах 100 %, таким чином, максимально можливий ступінь завантаженості складає 400 % [1].



Рис. 5. Приклад експерименту з міткою QR

Fig. 5. The QR tag experiment example



Рис. 6. Приклад експерименту з комбінацією трьох різновидів міток

Fig. 6. Combination of 3 tag types experiment example



Рис. 7. Одночасне сканування 35 маркерів ArUco

Fig. 7. Simultaneous scanning of 35 of ArUco markers

Показники проведених експериментів достатньо близькі до отриманих даних у розглянутій літературі про дослідження маркерів. У результаті серії експериментів визначено ймовірності правильного розпізнавання міток під час сканування під прямим кутом відносно камери на відстані в діапазоні від 0,3 до 2 метрів.

У межах зазначеного діапазону відстаней для кожного можливого значення маркерів ArUco було проведено 100 експериментів (по 2 експерименти на кожен маркер), у 99 із яких розпізнавання спрацьовує правильно, а отже, ймовірність розпізнавання  $P(AU) = 0,99$ .

Аналогічно проведено 96 експериментів для маркерів ARToolKitPlus (по 3 експерименти на кожен маркер) у тому самому діапазоні відстаней. За результатами, мітки з номерами 5, 11 та 13 помилково розпізнаються, як мітки з іншими номерами цього ж словника, або як мітки зі словника ArUco. У 90 випадках із 96 розпізнавання проведено нормально, а отже, ймовірність розпізнавання  $P(ATK) = 0,9375$ .

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Розпізнавання QR-кодів відбувається найкраще на малих відстанях. У середньому успішним можна вважати розпізнавання кодів у 9 випадках із 10, тобто ймовірність розпізнавання  $P(QR) = 0,9$  [1].

### Наукова новизна та практична значимість

У результаті експериментального дослідження отримано значення ймовірностей правильного розпізнавання візуальних міток, а саме маркерів ArUco, ARToolKitPlus та QR-кодів. Отримані результати можна застосовувати під час створення, імітаційного моделювання та аналізу ефективності алгоритмів локалізації і сприйняття БТЗ всередині приміщень із використанням відповідних візуальних міток.

Запропонована узагальнена структура підсистеми обробки візуальних міток системи локалізації та сприйняття БТЗ може бути використана під час розробки систем керування БТЗ.

### Висновки

Проведено дослідження ефективності застосування візуальних міток для задач локалізації БТЗ всередині приміщень, із використанням камери машинного зору JeVois–A33 з програмним модулем для роботи з різними типами візуальних маркерів JeVois Markers Combo і графічним інтерфейсом JeVois Inventor. У результаті проведених експериментів визначено ймовірності коректного розпізнавання для кожного з типів візуальних міток (маркерів ArUco, ARToolKitPlus та QR-кодів). Запропоновано структуру підсистеми обробки візуальних міток.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Остапець Я. Д. *Дослідження систем і алгоритмів керування безпілотними транспортними засобами* : дипломна робота. Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2024. 89 с.
2. Benligiray B., Topal C., Akinlar C. STag: A stable fiducial marker system. *Image and Vision Computing*. 2019. Vol. 89. P. 158–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.06.007>
3. dos Santos Cesar D. B., Gaudig C., Fritsche M., dos Reis M. A., Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. *OCEANS 2015 – Genova* (Genova, 18–21 May 2015). Genova, 2015. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/oceans-genova.2015.7271491>
4. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Marín-Jiménez M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47. Iss. 6. P. 2280–2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
5. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Medina-Carnicer R. Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition*. 2016. Vol. 51. P. 481–491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023>
6. Lightbody P., Krajník T., Hanheide M. An Efficient Visual Fiducial Localisation System. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*. 2017. Vol. 17. Iss. 3. P. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1145/3161534.3161537>
7. Minor B. *Reverse-Engineering Fiducial Markers For Perception*. *Tangram Vision*. URL: <https://www.tangramvision.com/blog/reverse-engineering-fiducial-markers-for-perception#further-resources>
8. Pătru G.-C., Pirvan A.-I., Rosner D., Rughiniş R.-V. Fiducial marker systems overview and empirical analysis of ArUco, AprilTag and CCTag. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*. 2023. Vol. 85. Iss. 2. P. 49–62.
9. Siki Z., Takács B. Automatic Recognition of ArUco Codes in Land Surveying Tasks. *Baltic Journal of Modern Computing*. 2021. Vol. 9, No 1. P. 115–125. DOI: <https://doi.org/10.22364/bjmc.2021.9.1.06>
10. Zakiev A., Tsoy T., Shabalina K., Magid E., Saha S. K. Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance under Noisy Sensory Data. *2020 International Joint Conference on Neural Networks* (Glasgow, 19–24 July 2020). Glasgow, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9207701>
11. Zhang X., Fronz S., Navab N. Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study. *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. (Darmstadt, 01–01 Oct. 2002). Darmstadt, 2002. P. 97–106. DOI: <https://doi.org/10.1109/ismar.2002.1115078>

Y. D. OSTAPETS<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail oyar@i.ua, ORCID 0000-0003-1976-5188

## Experimental Evaluation of The Effectiveness of Using Visual Cues for Controlling Unmanned Vehicles

**Purpose.** The study aims to experimentally evaluate the effectiveness of using visual cues, namely ARToolKitPlus, ArUco markers and two-dimensional QR (quick response code) codes in the tasks of localizing unmanned vehicles (UVs) indoors. **Methodology.** To enable the implementation of the processes of localization and perception of unmanned vehicles based on visual marks (markers), the structure of the visual marks processing subsystem has been developed. An algorithm for the combined use of three types of visual markers – ARToolKitPlus, ArUco markers and QR codes – for localizing unmanned vehicles and identifying cargo is proposed using the example of an online store warehouse scenario. To conduct experiments on the markers, we chose a hardware and software tool such as the JeVois-A33 smart machine vision camera with the JeVois Markers Combo software module and the JeVois Inventor graphical interface. **Findings.** An experimental study of the possibility of correct recognition of visual marks for indoor working conditions was carried out. As a result of a series of experiments, the possibilities of correct recognition of visual marks such as ArUco, ARToolKitPlus markers and QR codes during scanning at right angles to the camera at a distance ranging from 0.3 to 2 meters were determined. **Originality.** The study obtained the probabilities of correct recognition of ArUco, ARToolKitPlus markers and two-dimensional QR codes in the conditions of localization of unmanned vehicles indoors. **Practical value.** The obtained results of the study can be used to create, simulate, and analyze the effectiveness of algorithms for localizing and perceiving unmanned vehicles indoors using appropriate visual markers. The proposed generalized structure of the visual marker processing subsystem of the localization and perception system can be used in the development of unmanned vehicle control systems.

**Keywords:** unmanned vehicle (UV); localization; fiducial marker; visual marker; ArUco; ARToolKitPlus; QR code; JeVois-A33 machine vision camera

### REFERENCES

- Ostapets, Y. D. (2024). *Research of systems and algorithms for controlling unmanned vehicles* (Master's thesis). Ukrainian State University of Science and Technology. Dnipro. (in English)
- Benligray, B., Topal, C., & Akinlar, C. (2019). STag: A stable fiducial marker system. *Image and Vision Computing*, 89, 158-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.06.007> (in English)
- dos Santos Cesar, D. B., Gaudig, C., Fritsche, M., dos Reis, M. A., & Kirchner, F. (2015, May). An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. In *OCEANS 2015 – Genova* (pp. 1-7). Genova, Italy. DOI: <https://doi.org/10.1109/oceans-genova.2015.7271491> (in English)
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6), 2280-2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005> (in English)
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Medina-Carnicer, R. (2016). Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition*, 51, 481-491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023> (in English)
- Lightbody, P., Krajník, T., & Hanheide, M. (2017). An efficient visual fiducial localisation system. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*, 17(3), 28-37. DOI: <https://doi.org/10.1145/3161534.3161537> (in English)
- Minor, B. *Reverse-Engineering Fiducial Markers For Perception. Tangram Vision*. Retrieved from <https://www.tangramvision.com/blog/reverse-engineering-fiducial-markers-for-perception#further-resources> (in English)
- Pătru, G-C., Pîrvan, A-I., Rosner, D., & Rughiniş, R-V. (2023). Fiducial marker systems overview and empirical analysis of ArUco, AprilTag and CCTag. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*, 85(2), 49-62. (in English)
- Siki, Z., & Takács, B. (2021). Automatic Recognition of ArUco Codes in Land Surveying Tasks. *Baltic Journal of Modern Computing*, 9(1), 115-125. DOI: <https://doi.org/10.22364/bjmc.2021.9.1.06> (in English)
- Zakiev, A., Tsoy, T., Shabalina, K., Magid, E., & Saha, S. K. (2020, July). Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance under Noisy Sensory Data. In *2020*

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

---

*International Joint Conference on Neural Networks* (pp. 1-6). Glasgow, United Kingdom.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9207701> (in English)

11. Zhang, X., Fronz, S., & Navab, N. (2002, Oct.). Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study. In *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 97-106). Darmstadt, Germany. DOI: <https://doi.org/10.1109/ismar.2002.1115078> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.02.2024

Прийнята до друку: 27.06.2024

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## UDC 669.141.24:621.785.4

I. O. VAKULENKO<sup>1\*</sup>, S. O. PLITCHENKO<sup>2</sup>, K. ASGAROV<sup>3</sup>, B. V. LYTVYNOV<sup>4</sup>,  
A. ORAK<sup>5</sup>, H. UMUR<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Condensed Matter Physics», Dniprovsky State Technical University, Dniprobudivs'ka St, 2, Kamianske, Ukraine, 51900, tel. +38(097) 437 72 21, e-mail vakulenko\_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

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

<sup>3</sup>Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Kılavuzlar Mahallesi 413/Sokak No 7, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (538) 455 04 45, e-mail hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

<sup>4</sup>Dep. «Condensed Matter Physics», Dniprovsky State Technical University, Dniprobudivs'ka St, 2, Kamianske, Ukraine, 51900, tel. +38(097) 437 72 21, e-mail BohdanLytyvynov@gmail.com, ORCID 0009-0008-1859-7470

<sup>5</sup>Dep. «Mechanical Engineering», Yalova University, Bahçelievler Mah. Çınarcık Yolu Caddesi No 26, Yalova, Turkey, 77200, e-mail abdulcadir.orak@yalova.edu.tr, ORCID 0000-0001-6611-4535

<sup>6</sup>Dep. «Metallurgical and Materials Engineering», Institute of Science and Technology Kocaeli University, Kabaoglu, Baki Komsuoglu bulvarı No 515, Umuttepe, Izmit. Kocaeli, Turkey, 41001, e-mail hakanumur41@gmail.com, ORCID 0000-0003-4887-8093

## Influence of the Isothermal Transformation Temperature on the Structure and Properties of Low-Carbon Steel

**Purpose.** The study is aimed at evaluating the effect of the isothermal transformation temperature on the structure and properties of low-carbon steel. **Methodology.** The material for the study was a 3 mm diameter wire made of mild steel with the following chemical composition: 0.21% C, 0.47% Mn, 1.2% Si, 0.1% Cr, 0.03% S, 0.012% P. The 0.3 m long wire samples were subjected to austenitizing at 920 °C for 8...9 min, after which they were held isothermally for 11 min at temperatures of 650...200 °C, followed by cooling in air. The strength, plastic properties, and strain hardening coefficient were determined from the analysis of tensile curves. **Findings.** It was found that a decrease in the temperature of isothermal transformation, starting from 450...400 °C, increases the amount of Widmannstätten ferrite due to the disappearance of polyhedral ferrite grains. At the same time, the number of areas with locally located dispersed cementite particles similar to pearlite colonies increases, and bainite crystals appear. Against the background of a sharp decrease in the strain hardening coefficient in the range of 450...400 °C, the ability of the bainite phase to undergo plastic deformation should be considered one of the reasons for the delay in density reduction. **Originality.** The effect of steel hardening with a decrease in the pearlite transformation temperature is based on the grinding of ferrite grains, an increase in the amount of Widmannstätten ferrite, and the dispersion of pearlite colonies. The strengthening effect of steel with a bainite structure is based on an increase in the degree of supersaturation of the solid solution with carbon atoms and dispersion hardening by particles of the carbide phase. **Practical value.** The optimal structural state of steel intended for the manufacture of such critical elements as a support beam, railroad car bogie, etc. is a mixture of phase components with different dispersion and morphology, and their quantitative ratio is determined by the operating conditions of a particular product.

**Keywords:** low-carbon steel; austenite; ferrite; temperature; isothermal transformation; dislocation; recrystallization; yield strength

### Introduction

For the manufacture of certain supporting elements of railway cars, such as a center beam, carriage bogie, etc. they use shaped rolled products

from low-carbon steels [1]. It is believed that use of rolled products with increased strength properties is a key to increasing reliability at operation of the railway cars for various purposes.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Compared to the structure of low-carbon steel after hot plastic deformation, use of thermal strengthening in flow of a rolling mill is accompanied by qualitative changes at structural state and the corresponding set of properties.

Proportional to cross-section of the rolled product, the difficulty achieving a critical cooling rate causes to formation gradient of structures, starting from the surface of intensive heat removal [3]. Considering process formation of a thermally strengthened surface layer in rolled steel, several mutually dependent factors are discovered that determine mechanism of austenite transformation during steel cooling [13].

One of them is ability of ferrite to inherit chemical elements that are dissolved in austenite. This phenomenon can have a certain influence on the mechanism of austenite transformation [14]. For low-carbon steel, a fairly narrow temperature range transition from the shear mechanism of austenite transformation to intermediate one is sensitive to minor changes in cooling conditions [4]. Thus, low stability of low-carbon steel austenite during cooling [3, 5] and change in the activity of carbon atoms at inter phase during transformation process [14] can affect the transformation rate.

At same time, diffusion of carbon atoms in phase components of the steel should also change [13]. Based on this, a continuous decrease at cooling rate, as volumes of metal move away from surface of the rolled product, in its effect on the structure and properties, can be represented as an increase in the temperature at end of forced cooling. In this case, continuous change at dispersion and morphology phase components of the steel will correspond to gradient of temperature by forced cooling of the rolled product [7, 11].

### Purpose

The purpose of the work was to assess influence temperature isothermal transformation on the structure and properties of low-carbon steel.

### Methodology

The material for study was a wire with a diameter of 3 mm, made of low-carbon steel, with a concentration of chemical elements: 0.21% *C*, 0.47% *Mn*, 1.2% *Si*, 0.1% *Cr*, 0.03% *S*, 0.012% *P*. Differ-

ent structural states of steel were obtained after certain processing.

Wire samples 0.3 m long were subjected to austenitization at a temperature of 920 °C for 8...9 minutes. This was followed by isothermal holding for 11 minutes at temperatures of 650...200 °C and cooling on air. Heating of the samples to the austenitization temperature, isothermal holding of the metal was carried out in molten mixtures of various salts.

The preparation of objects and study of the microstructure were carried out using light and electron microscopy techniques [2]. Strength, plastic properties and strain hardening coefficient (*n*) were determined from the analysis of tensile curves [10, 12].

### Findings

The process forming structure of the thermally strengthened steel after completion of hot deformation can be represented at form of an isothermal transformation of austenite at temperature of the end accelerated cooling.

At temperature range until the minimum stability of austenite is achieved, the diffusion transformation mechanism will determine morphology and dispersity structural components of the steel under study. Thus, at transformation temperature range starting from 650 °C, the formed structure consists of sections similar to Widmanstätten ferrite (Fig. 1, *a*), polyhedral ferrite grains and pearlite colonies of certain dispersion.

It should be expected that at temperatures isothermal transformation of the austenite by the diffusion mechanism, formation of the structure is determined by a quantitative relationship of the structural components and their dispersity, without qualitative changes in the phase composition of the steel. Indeed, with a decrease at isothermal transformation temperature to 600 °C, against the background dispersion of structural components, a progressive decrease at number of polyhedral ferrite grains is observed (Fig. 1, *b*). At the same time, proportion of the Widmanstätten ferrite and pearlite colonies of increased dispersion increases (Fig. 1, *c*).

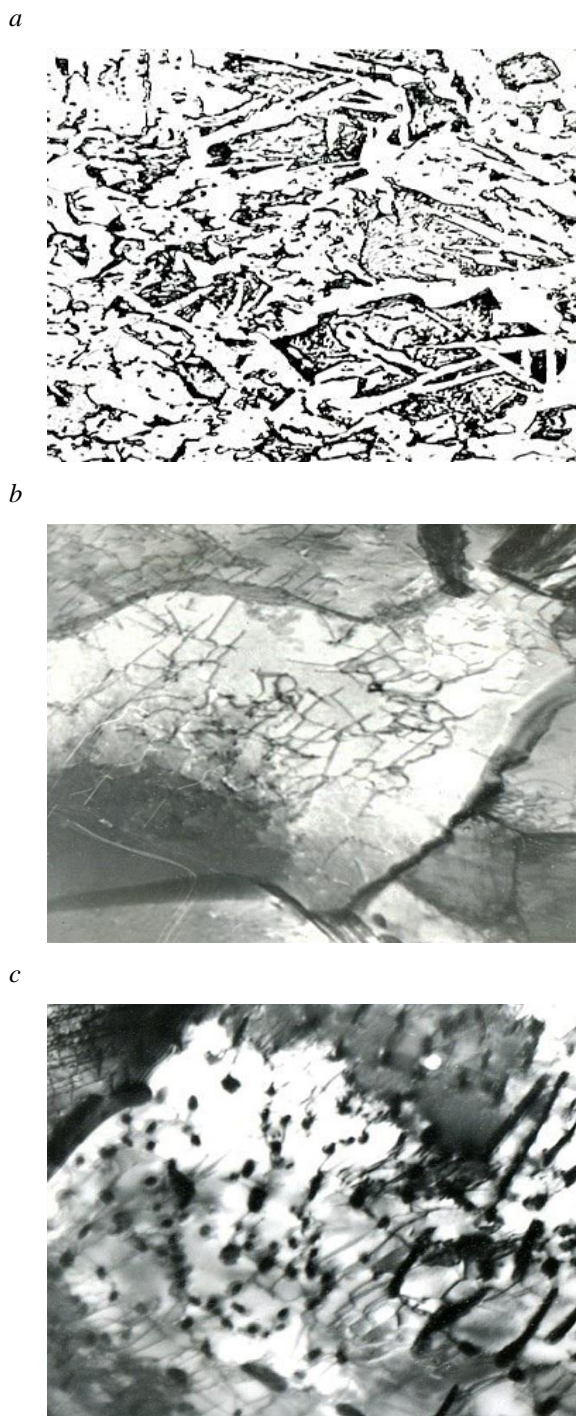


Fig. 1. Structure of the low-carbon steel after isothermal transformation at temperatures of 650 °C (*a*) and 600 °C (*b*, *c*). Magnification: *a* – 1000; *b* – 6000; *c* – 10000

The absence of qualitative changes in the structure of steel when the transformation temperature is reduced to 600 °C is explained by the insuffi-

cient stability of the austenite during cooling [3, 12], which is similar to the effect of reducing the carbon concentration in steel. A further decrease at temperature isothermal transformation of the austenite to range of 500...400 °C, against the background of continued dispersion of the structural components, the first qualitative changes in the phase components of the steel are already observed (Fig. 2, *a*).

With a decrease at average grain size of the polyhedral ferrite and its volume fraction, there is a simultaneous increase at amount of Widmanstätten ferrite with a beginning of a change in its morphology (Fig. 2, *b*). This situation is more clearly illustrated structure of the steel after isothermal transformation of the austenite at 400 °C (Fig. 2, *c*).

Thus, number individual plates of the Widmanstätten ferrite that are formed at a temperature of 500 °C (Fig. 2, *a*) become significantly smaller at 400 °C. In proportion to decrease at transformation temperature, dispersion of compactly located cementite particles also increases (Fig. 2, *d*).

Moreover, Widmanstätten ferrite begins to form at form of two varieties: branched formations and in the form of a package of plates (Fig. 2, *c*). These changes at structure should be considered as an approach to the temperatures of a possible change at mechanism of the austenite transformation [3, 11]. Thus, when the isothermal transformation temperature decreases below 400 °C, qualitative changes at structural state of the steel should be expected.

The formed structure after isothermal transformation at temperatures of 300 and 200 °C confirms these expectations. Considering that even a slight decrease at isothermal transformation temperature, starting from 350 °C, leads to a rapid decrease at number of the polyhedral ferrite grains [3, 12], at 300 °C it is quite difficult to detect them (Fig. 3, *a*).

At the same time, areas resembling highly dispersed pearlite colonies are found (Fig. 3, *b*), and the appearance volumes of metal with a bainite structure (Fig. 3, *c*) should be considered as evidence of its qualitative changes.

After reducing isothermal transformation temperature to 200 °C, no signs of austenite transformation by a shear mechanism were found in the steel structure (Fig. 4).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

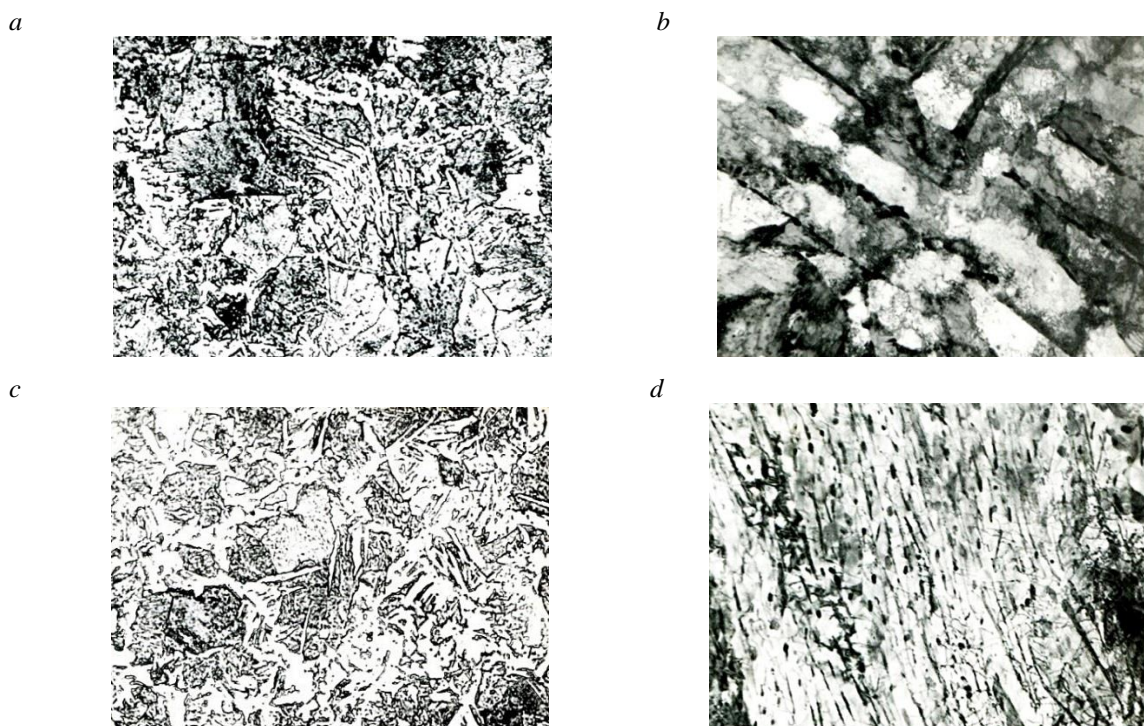


Fig. 2. The structure of low-carbon steel after isothermal transformation at temperatures of 500 °C (*a, b*) and 400 °C (*c, d*). Magnification: *a, c* – 1000; *b* – 6000; *d* – 14000

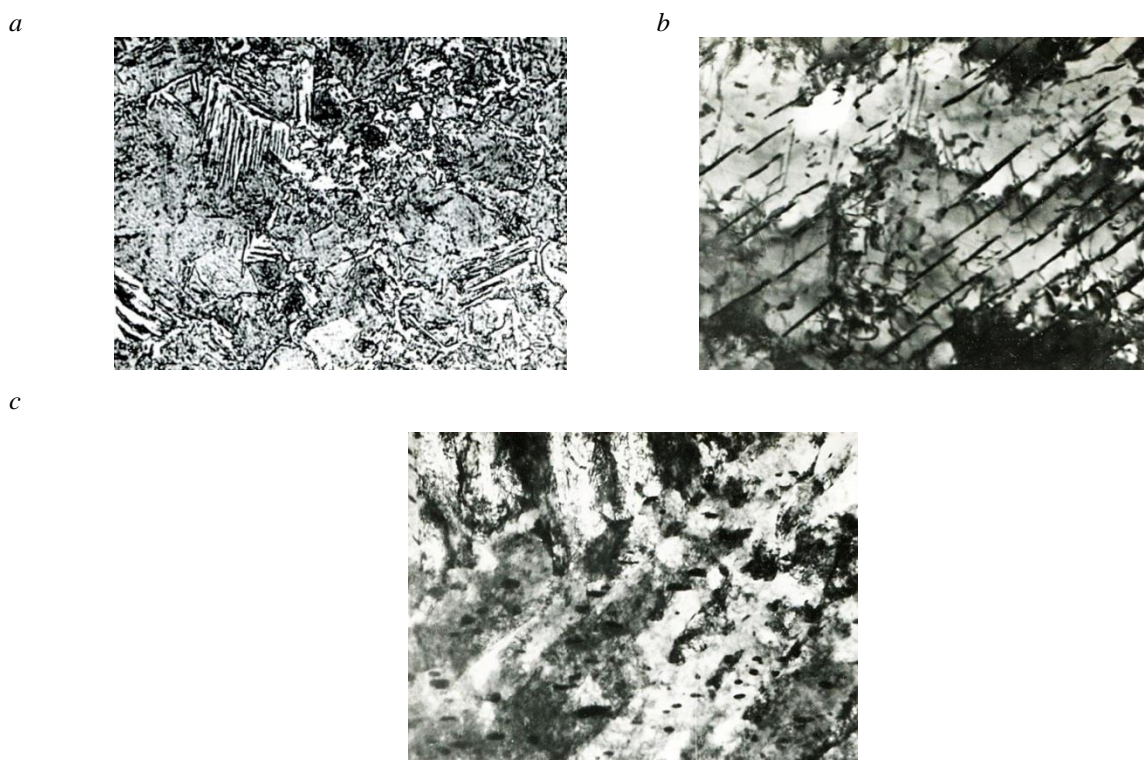


Fig. 3. Structure of the low-carbon steel after isothermal transformation at temperature of 300 °C. Magnification: *a* – 1000; *b, c* – 18000

*a**b**c*

Fig. 4. Structure of low-carbon steel after isothermal transformation at a temperature of 200 °C.

Magnification:

*a* – 1000; *b, c* – 18000

The structure consists of bainite crystals (Fig. 4, *a, b*) and fine cementite particles with a local arrangement, similar to the eutectoid colony (Fig. 4, *c*). One of the reasons for the absence of martensite may be a low stability of the austenite in low-carbon steel due to the high temperature of

the onset martensite transformation ( $M_S$ ).  $M_S$  can be estimated using A. Popov's relation:

$$M_S = 520 - 320 (\% C) - 50 (\% Mn) - 30 (\% Cr) - 20 (\% Ni + \% Mo) - 5 (\% Si + \% Cu), \quad (1)$$

where %  $C$  – is designation concentration of the carbon and other chemical elements, showed a value of 423 °C, which coincides with a known experimental data (420...400 °C) [3, 11].

Based on this, preventing intermediate decomposition of austenite during cooling and isothermal holding at 200 °C is a rather difficult task. As a result of partial decomposition of austenite, in proportion to degree of its super cooling, starting from temperatures order of 400 °C, a gradual increase at volume fraction of the bainite phase in the steel structure occurs. In general, it can be assumed that at process of isothermal cooling low-carbon steel to temperatures order  $M_S$ , qualitatively similar structures are formed, differing only in the ratio of structural components and their dispersion.

When the temperature decreases below  $M_S$ , a gradual replacement products of austenite transformation by the diffusion mechanism with an intermediate one occurs [8]. The observed transformation of the steel structure depending on the temperature isothermal transformation of austenite corresponds to a very definite nature change in mechanical properties (Fig. 5).

In view of the fact that range changes in the relative narrowing is 73...75%, uniform elongation ( $\delta_p$ ) was used as a characteristic plasticity of the steel.

From analysis of the presented dependences it follows that an increase at transformation temperature is accompanied by a quite expected decrease in strength characteristics and increase ductility. At the same time, ability of the metal to strain hardening changes according to a more complex dependence (Fig. 5, *c*).

In general, the observed violations monotonic nature of changes in properties indicate to need for conditionally dividing curves into separate sections: *I* (650...500 °C), *II* (450...350 °C), *III* (300...200 °C), with qualitatively others character behavior.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

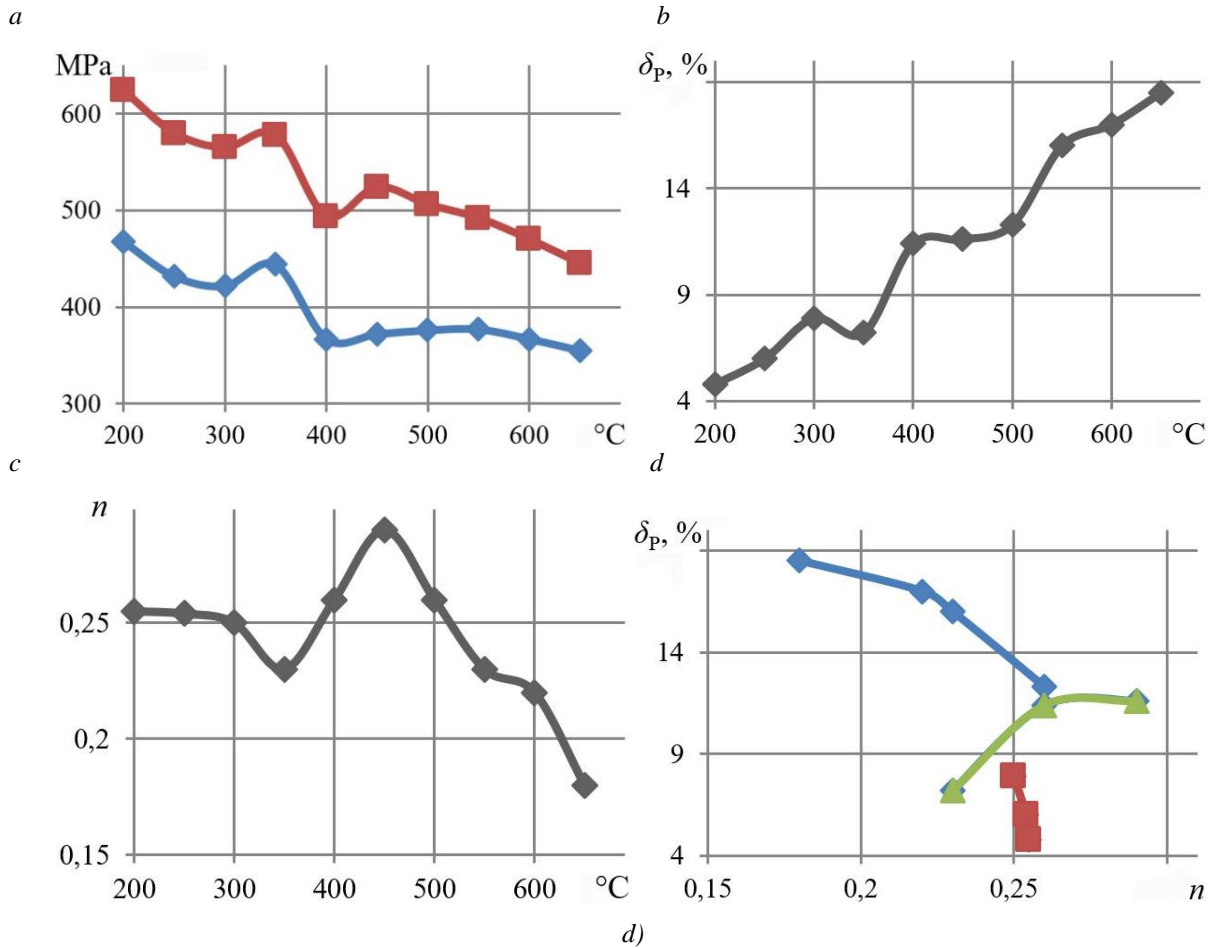


Fig. 5. Influence temperature isothermal transformation of the austenite on yield strength (♦), strength (■) – (a), uniform elongation – (b), strain hardening coefficient (c) and the mutual change in  $n - \delta_p$  (for sections of temperature: I – ♦; II – ▲; III – ■) (d)

For section I (Fig. 5), starting from 650 °C, a gradual decrease at isothermal transformation temperature to 500...450 °C is accompanied by a monotonic decrease in  $\delta_p$ , an increase in strength characteristics (yield stress –  $\sigma_y$  and strength stress –  $\sigma_s$ ) and ability of the metal to strain hardening ( $n$ ).

The given nature change in mechanical properties is explained by the evolution of the structure and phase composition of steel. Indeed, as follows from analysis of the microstructure (Fig. 1), when isothermal transformation temperature decreases from 650...600 °C (Fig. 1) to 500 °C (Fig. 2, a, b), there are practically no qualitative changes structure. The phase composition remains largely constant and only quantitative ratio and dispersion of the structural components changes.

In general, increase in strength properties is due to increase in the amount of Widmanstätten ferrite, a decrease grain size of polyhedral ferrite ( $d_p$ ) and thickness ferrite gap of the pearlite colony ( $\lambda$ ) [3, 12]. If we take into account that according to stoichiometry for the steel under study, the amount of pearlite component does not exceed 30%, for temperatures of 650...600 °C,  $d_p$  should be taken as the main structural element, although presence of Widmanstätten ferrite may distort its effect.

On other hand, when assessing the role of  $d_p$ , it should be taken into account that only at absence substructural components and super saturation of the ferrite with carbon atoms, the main structural element of low-carbon steel is a ferrite grain size.

In this case, strain hardening coefficient and plasticity of steel are directly proportional to each other [9]. For a pearlite colony, a qualitatively dif-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ferent relationship is observed: decrease in  $\lambda$  promotes an increase ductility of eutectoid steel with a decrease in  $n$  [12]. Thus, when the austenite transformation temperature changes from 650 to 500 °C, ferrite grain refinement, an increase in the amount of Widmanstätten ferrite and its super saturation with carbon atoms are the main factors reducing  $\delta_p$ . Dispersing pearlite colonies, on the contrary, should increase  $\delta_p$ .

However, the amount of perlite is not enough to have an effective effect and the end result is a decrease in  $\delta_p$ . In this case, the strain hardening coefficient and  $d_p$  are inversely proportional to each other (Fig. 5, *d*). A decrease at temperature of the isothermal transformation austenite in section (*II*) is accompanied, similarly to (*I*), by an increase in strength and a decrease in plastic characteristics. The exception is  $n$ .

The observed nature of the  $n$  dependence indicates the appearance of changes in the steel structure that can influence development of strain hardening processes (Fig. 5, *c*). Indeed, as follows from analysis of the microstructure (Fig. 2, *c*), decrease at isothermal transformation temperature starting from 450...400 °C increases amount of Widmanstätten ferrite due to the disappearance of polyhedral ferrite grains. At the same time, the number of areas with locally located dispersed cementite particles, similar to pearlite colonies, increases.

Moreover, as follows from results of study [7, 11], for steel of a similar composition after isothermal transformation of austenite at 450...400 °C, volumes are found in the structure that are similar in appearance to bainite crystals. Based on this, it can be assumed that appearance of the bainite phase is one of reasons for qualitative changes in the dependencies of steel properties. Against the background of a sharp decrease at strain hardening coefficient in the range of 450...400 °C, the ability of the bainite phase to undergo plastic deformation [3, 13] should be considered as one of the reasons for delay in reducing  $\delta_p$ .

On other hand, at a temperature of 350 °C, the almost complete disappearance of Widmanstätten ferrite and increase at amount of bainite phase, dispersion particles of cementite (Fig. 3, *c*) and decrease at number of pearlite colonies (Fig. 3, *b*), together lead to a sharp decrease at ductility of steel. As an additional source of reduction in steel

ductility, differences in the ability to strain hardening of bainite and pearlite should be considered, which is confirmed by the  $n - \delta_p$  ratio (Fig. 5, *d*, designation ▲).

In section *III*, a decrease in temperature from 300 to 200 °C is accompanied by the formation bainite structure (Fig. 3, 4). In this case, the strain hardening coefficient remains practically unchanged (Fig. 5, *d*), which is confirmed by the equidistant arrangement of the curves  $\sigma_y$  and  $\sigma_s$  versus transformation temperature (Fig. 5, *a*).

The sharp decrease in steel ductility is due to the combined effect super saturation of the solid solution with carbon atoms during formation of bainite crystals [13, 14] (Fig. 3, *c* and 4, *b*) and dispersion strengthening from carbide phase particles (Fig. 4, *c*) [2, 6].

According results of the studies [2, 5, 7], it is determined that steels with perlite structures after thermal strengthening, compared to martensite and bainite structures, have increased resistance against heating and cyclic loads.

On a basis of this, one of the directions determining optimal structural state of steel for manufacture of a particular product, should be mixture with a various ratio of phase components, taking into account the conditions of its operation.

### Originality and practical value

The effect of steel strengthening with a decrease at pearlite transformation temperature is based on the refinement of the ferrite grains, an increase at amount of Widmanstätten ferrite, and dispersion of pearlite colonies. The strengthening effect at steel with bainite structure based on an increase degree of super saturation of the solid solution with carbon atoms and dispersion strengthening by carbide phase particles.

The directions determining optimal structural state of steel for manufacture backbone beam, wagon trolley, etc., should be mixture with various ratio of phase components, taking into account the conditions of its operation.

### Conclusions

1. A change at mechanism of austenite transformation during isothermal cooling of the steel is accompanied by qualitative changes in structure and properties.

2. The effect of steel strengthening with a decrease at pearlite transformation temperature is based on the refinement of the ferrite grains, an increase at amount of Widmanstätten ferrite, and dispersion of pearlite colonies.

3. The transition from the diffusion mechanism of austenite transformation to the intermediate one

leads to the gradual replacement of Widmanstätten ferrite and pearlite colonies with bainite crystals. The strengthening effect in steel is based on an increase in the degree of super saturation of the solid solution with carbon atoms during the formation of bainite and dispersion strengthening by carbide phase particles.

#### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Baranovskyi D., Myamlin S., Kebal I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16. Iss. 3. P. 219–225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935>
2. Cognigni F., Miraglia L., Contessi S., Biancardi F., Rossi M. Correlative Light and Electron Microscopy (CLEM): A Multifaceted Tool for the Study of Geological Specimens. *Journal of Experimental and Theoretical Analyses*. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 74–85. DOI: <https://doi.org/10.3390/jeta1020006>
3. Cong J., Zhao J., Wang X., Wu Z. Effect of a gradient temperature rolling process on the microstructure and mechanical properties of the center of ultra-heavy plates. *Metals*. 2024. Vol. 14. Iss. 2. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14020199>
4. Guan J., Liu M., Tian J., Chen Z., Xu G. Effects of isothermal transformation at the quenching temperature on the microstructure and mechanical properties of a medium-carbon steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021. Vol. 74. P. 3265–3272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02399-z>
5. Guo K., Pan T., Zhang N., Meng L., Luo X., Chai F. Effect of Microstructural Evolution on the Mechanical Properties of Ni-Cr-Mo Ultra-Heavy Steel Plate. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041607>
6. Hillert M. *Phase equilibria, phase diagrams and phase transformations. Their thermodynamic basis*. Cambridge University Press, 2007. 526 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511812781>
7. Kafadar G., Kalkanli A., Özdemir A. T., Ögel B. Effect of isothermal transformation treatment and tempering on the microstructure and hardness of a medium C and high Si steels. *The Iron and Steel Institute of Japan International*. 2021. Vol. 61. Iss. 5. P. 1679–1687. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-419>
8. Liu M., Wang J., Zhang Q., Hu H., Xu G. Optimized properties of a quenching and partitioning steel by quenching at fine martensite start temperature. *Metals and Materials International*. 2021. Vol. 27. P. 2473–2480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00726-5>
9. Opiela M., Fojt-Dymara G., Grajcar A., Borek W. Effect of grain size on the microstructure and strain hardening behavior of solution heat-treated low-C high-Mn steel. *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13. Iss. 7. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071489>
10. Tsuchida N., Inoue T., Nakado H. Effect of ferrite grain size on the estimated true stress – strain relationship up to the plastic deformation limit in low carbon ferrite – cementite steels. *Journal of Materials Research*. 2013. Vol. 28. Iss. 18. P. 2171–2179. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.221>
11. Vakulenko I. O. Influence of cooling rate on the strength of the rims of railway wheel. *Materials Science*. 2016. Vol. 51. Iss. 6. P. 839–842. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9910-8>
12. Vakulenko I. A., Vakulenko L., Dal S., Asgarov Kh., Bolotova D., Kurt B. *Structure evolution in steels of railway wheels at manufacture and operations*. Nobel Bilimsel Eserler, 2023. 270 p.
13. Wang J., Hong H., Huang A., Yang X., Qian R., Shang C. New insight into the relationship between grain boundaries and hardness in bainitic/martensitic steels from the crystallographic perspective. *Materials Letters*. 2022. Iss. 308. P. 131105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131105>
14. Wang J., Qian R., Huang S., Shang C. Effect of double-quenching on the hardness and toughness of a wear-resistant steel. *Metals*. 2022. Vol. 13. P. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13010061>

I. O. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. О. ПЛІТЧЕНКО<sup>2</sup>, Х. АСГАРОВ<sup>3</sup>, Б. В. ЛИТВИНОВ<sup>4</sup>, А. ОРАК<sup>5</sup>,  
Х. УМУР<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «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

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

<sup>3</sup>Каф. «Машинобудування», Карабюкський університет, Кілавузлар Махаллесі 413/Сокак №7, Карабюк, Туреччина, 78050, тел. +90 (538) 455 04 45, ел. пошта hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

<sup>4</sup>Каф. «Фізика конденсованого стану», Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51900, тел. +38 (097) 437-72-21, ел. пошта BohdanLytvynov@gmail.com, ORCID 0009-0008-1859-7470

<sup>5</sup>Каф. «Машинобудування», Яловський університет, Бахчелієвлер Мах. Чинарджик Йолу Каддезі №26, Ялова, Туреччина, 77200, ел. пошта abdulkadir.orak@yalova.edu.tr, ORCID 0000-0001-6611-4535

<sup>6</sup>Каф. «Металургія та матеріалознавство», Інститут науки і технологій Університету Коджаелі, Кабаоглу, бульвар Баки Комсуоглу № 515, Умуттепе, Ізміт, Коджаелі, Туреччина, 41001, ел. пошта hakanumur41@gmail.com, ORCID 0000-0003-4887-8093

## Вплив температури ізотермічного перетворення на структуру і властивості низьковуглецевої сталі

**Мета.** Дослідження спрямовано на оцінку впливу температури ізотермічного перетворення на структуру та властивості низьковуглецевої сталі. **Методика.** Матеріалом для дослідження був дріт діаметром 3 мм, виготовлений із низьковуглецевої сталі з таким хімічним складом: 0,21 % С, 0,47 % Мп, 1,2 % Si, 0,1 % Cr, 0,03 % S, 0,012 % Р. Зразки дроту довжиною 0,3 м піддавали аустенізації за температури 920 °С протягом 8...9 хв, після чого виконували ізотермічну витримку протягом 11 хв за температур 650...200 °С з подальшим охолодженням на повітрі. З аналізу кривих розтягу визначали міцність, пластичні властивості та коефіцієнт деформаційного зміцнення. **Результати.** Установлено, що зниження температури ізотермічного перетворення, починаючи з 450...400 °С, збільшує кількість фериту Відманштеттена за рахунок зникнення поліедричних феритових зерен. При цьому збільшується кількість ділянок із локально розташованими дисперсними частинками цементиту, схожими на колонії перліту, та з'являються кристали бейніту. На фоні різкого зниження коефіцієнта деформаційного зміцнення в діапазоні 450...400 °С однією з причин затримки зниження щільності слід вважати здатність бейнітної фази до пластичної деформації. **Наукова новизна.** Ефект зміцнення сталі зі зниженням температури перетворення перліту заснований на подрібненні зерен фериту, збільшенні кількості фериту Відманштеттена та дисперсії колоній перліту. Зміцнювальний ефект сталі зі структурою бейніту ґрунтується на підвищенні ступеня перенасичення твердого розчину атомами вуглецю та дисперсійного зміцнення частинками карбідної фази. **Практична значимість.** Оптиміальний структурний стан сталі, призначеної для виготовлення таких відповідальних елементів, як опорна балка, візок вагона та ін., становить суміш фазових складових із різною дисперсністю та морфологією, а їх кількісне співвідношення визначають за умовами експлуатації конкретного виробу.

**Ключові слова:** низьковуглецева сталь; аустеніт; ферит; температура; ізотермічне перетворення; дислокація; рекристалізація; межа плинності

## REFERENCES

1. Baranovskyi, D., Myamlin, S., & Keбал, I. (2022). Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(3), 219-225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935> (in English)
2. Cognigni, F., Miraglia, L., Contessi, S., Biancardi, F., & Rossi, M. (2023). Correlative light and electron microscopy (CLEM): a multifaceted tool for the study of geological specimens. *Journal of Experimental and Theoretical Analyze*, 1(2), 74-85. DOI: <https://doi.org/10.3390/jeta1020006> (in English)
3. Cong, J., Zhao, J., Wang, X., & Wu, Z. (2024). Effect of a gradient temperature rolling process on the microstructure and mechanical properties of the center of ultra-heavy plates. *Metals*, 14(2), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14020199> (in English)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4. Guan, J., Liu, M., Tian, J., Chen, Z., & Xu, G. (2021). Effects of isothermal transformation at the quenching temperature on the microstructure and mechanical properties of a medium-carbon steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74, 3265-3272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02399-z> (in English)
5. Guo, K., Pan, T., Zhang, N., Meng, L., Luo, X., & Chai, F. (2023). Effect of microstructural evolution on the mechanical properties of Ni-Cr-Mo ultra-heavy steel plate. *Materials*, 16, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041607> (in English)
6. Hillert, M. (2007). *Phase equilibria, phase diagrams and phase transformations. Their thermodynamic basis*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511812781> (in English)
7. Kafadar, G., Kalkanli, A., Özdemir, A. T., & Ögel, B. (2021). Effect of isothermal transformation treatment and tempering on the microstructure and hardness of a medium C and high Si steels. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 61(5), 1679-1687. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-419> (in English)
8. Liu, M., Wang, J., Zhang, Q., Hu, H., & Xu, G. (2021). Optimized properties of a quenching and partitioning steel by quenching at fine martensite start temperature. *Metals and Materials International*, 27, 2473-2480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00726-5> (in English)
9. Opiela, M., Fojt-Dymara, G., Grajcar, A., & Borek, W. (2020). Effect of grain size on the microstructure and strain hardening behavior of solution heat-treated low-C high-Mn steel. *Materials (Basel)*, 13(7), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071489> (in English)
10. Tsuchida, N., Inoue, T., & Nakado, H. (2013). Effect of ferrite grain size on the estimated true stress – strain relationship up to the plastic deformation limit in low carbon ferrite – cementite steels. *Journal of Materials Research*, 28(18), 2171-2179. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.221> (in English)
11. Vakulenko, I. O. (2016). Influence of cooling rate on the strength of the rims of railway wheel. *Materials Science*, 51(6), 839-842. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9910-8> (in English)
12. 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*. Nobel Bilimsel Eserler. (in English)
13. Wang, J., Hong, H., Huang, A., Yang, X., Qian, R., & Shang, C. (2022). New insight into the relationship between grain boundaries and hardness in bainitic/martensitic steels from the crystallographic perspective. *Materials Letters*, 308, 131105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131105> (in English)
14. Wang, J., Qian, R., Huang, S., & Shang, C. (2022). Effect of double-quenching on the hardness and toughness of a wear-resistant steel. *Metals*, 13, 2-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13010061> (in English)

Надійшла до редколегії: 29.02.2024

Прийнята до друку: 28.06.2024

# РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.027.3-272.82

А. Я. КУЗИШИН<sup>1\*</sup>, В. В. КОВАЛЬЧУК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

<sup>2</sup>Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

## Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумоко-рдної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу

**Мета.** У роботі передбачено встановити закономірності деформування гумоко-рдної оболонки у вертикальному та горизонтальному напрямках в разі зміни величини внутрішнього тиску в пневматичній ресорі методом статичних експериментальних досліджень. **Методика.** Для встановлення закономірностей деформування гумоко-рдної оболонки пневматичної ресори використано статичний випробний стенд. Зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі досягнуто за допомогою компресора, а безпосередньо деформації гумоко-рдної оболонки виміряно високочастотними потенціометричними лінійними датчиками переміщень. Досліджено деформування гумоко-рдної оболонки пневматичної ресори як у вертикальній, так і в горизонтальній площині за умови зміни величини внутрішнього тиску в ресорі в межах від 0 до 5 атм. **Результати.** За допомогою спроектованого випробного стенда розроблено методику експериментальних досліджень деформування гумоко-рдної оболонки за підвищення внутрішнього тиску у пневматичній ресорі. Отримано залежності величини деформування гумоко-рдної оболонки пневматичної ресори в разі зміни внутрішнього тиску в діапазоні 0÷5,0 атм. Установлено, що деформування гумоко-рдної оболонки за збільшення внутрішнього тиску в пневматичній ресорі в горизонтальній площині відбувається інтенсивніше порівняно з вертикальною площиною. З'ясовано, що максимальні значення деформування гумоко-рдної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках спостерігаються на початковому етапі закачування повітря в діапазоні зміни тиску від 0 до 0,5 атм. Отримано поліноміальні рівняння, які описують залежності деформування гумоко-рдної оболонки пневматичної ресори. **Наукова новизна.** Установлено закономірності деформування гумоко-рдної оболонки у вертикальній та горизонтальній площинах за різних значень внутрішнього тиску в пневматичній ресорі методом експериментальних статичних досліджень. **Практична значимість.** Дослідження закономірностей деформування гумоко-рдної оболонки сприятиме більш точному моделюванню роботи пневматичної ресори та достовірному визначенню її динамічних показників. Це дозволить застосовувати динамічні показники пневматичної ресори у просторовій математичній моделі рухомого складу ще на етапі його проектування, а також проводити оцінку його динамічних показників та показників безпеки руху.

*Ключові слова:* пневматична ресора; гумоко-рдна оболонка; деформація; тиск; потенціометричний датчик лінійних переміщень

### Вступ

У процесі проектування швидкісного рухомого складу однією з основних задач є підбір параметрів системи ресорного підвішування. Це сприяє об'єктивному моделюванню динамічної поведінки рухомого складу під час взаємодії з рейковою колією та визначенню його динамічних показників та показників безпеки руху.

Як другий ступінь ресорного підвішування на сучасних швидкісних електро- та дизель-поїздах встановлюють пневматичну систему ресорного підвішування (рис. 1). Основними конструктивними елементами системи є пневматична ресора, додатковий резервуар та з'єднувальний трубопровід.

Пневматична ресора конструктивно являє собою гумоко-рдну оболонку, яка заповнена

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в робочому стані стисненим повітрям. Вона буває: балонного типу (працює тільки у вертикальному напрямку); подушкового типу (працює у вертикальному та поздовжньому напрямках); діафрагмового типу (працює у вертикальному та горизонтальному напрямках); комбінованого типу (допускає збільшені вертикальні переміщення порівняно з діафрагмовою).

Найбільшого поширення набула пневматична ресора діафрагмового типу, яка складається з: кріпильних болтів ущільнювального кільця 1, затискача плити ковзання 2, болтів ковзної плити 3, кріпильної плити 4, ущільнювального кільця 5, ковзної плити 6, гумокордної оболонки 7, нижньої плити 8, болтів нижньої плити 9, аварійної пружини 10 (рис. 1).

У процесі моделювання роботи пневматичної ресори важливо враховувати всі чинники впливу на її динамічні характеристики (жорсткість та коефіцієнт демпфування).

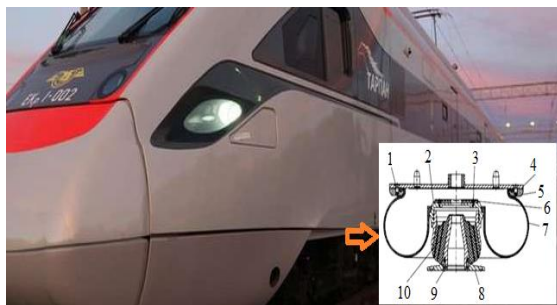


Рис. 1. Швидкісний електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан» з пневматичною ресорою діафрагмового типу

Fig. 1. High-speed electric train EKr–1 «Tarpan» with diaphragm-type pneumatic spring

У більшості математичних моделей роботу пневматичної ресори описано на основі законів термодинаміки та гідродинаміки. Однак важливим фактором є робота самої гумокордної оболонки, зокрема те, як вплив зміни внутрішнього тиску в ресорі призводить до її деформування. Такі теоретичні дослідження є складними та потребують складного математичного апарату. Тому дослідження такого роду слід проводити експериментально, використовуючи випробні стенди та вимірювальну апаратуру.

Неврахування роботи гумокордної оболонки може призвести до отримання недостовірних результатів та неправильного визначення динамічних характеристик пневматичної ресори.

Отже, дослідження закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниць є актуальним. Це дозволить достовірніше визначити динамічні характеристики пневматичної ресори.

### Мета

Основною метою роботи є встановлення закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниць у вертикальному та горизонтальному напрямках, у разі зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити методику статичних експериментальних досліджень деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори.
2. Дослідити закономірності деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках за зміни тиску від 0 до 5 атм.

### Методика

У процесі теоретичного дослідження роботи пневматичної ресори широко використовують еквівалентні механічні та термодинамічні моделі [2, 11].

Однак основним методом, який дозволяє кількісно визначити динамічну жорсткість і демпфувальні властивості пневмосистеми, що складається з гумокордної оболонки, додаткового резервуара та з'єднувального елемента, є експериментальний.

У роботі [1] автори розглянули конструктивні особливості гумокордних пружних елементів. Об'єктом дослідження була пневматична ресора балонного типу моделі І–15. За результатами стендових випробувань встановлено, що найкращі віброзахисні властивості мають оболонки з меншим кутом закрою. Відзначено, що конструктивні параметри гумокордної оболонки суттєво впливають на її віброзахисні властивості під час роботи в діапазоні низьких частот. Найефективніше гумокордна оболонка працює у спектрі високих частот.

У роботах [13, 17] автори розробили нелінійну модель пневматичної системи ресорного

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

підвішування та провели експериментальні дослідження її роботи в разі відмови зрівнювального клапана під час руху рухомого складу по кривій ділянці залізничної колії.

У роботах [4–6] наведено нелінійну математичну модель гумокордної оболонки пневматичної ресори. У моделі взаємозв'язок між силою та деформацією відбувається на основі суперпозиції сил пружності, тертя та в'язкості.

У роботі [19] автори запропонували динамічну модель пневматичної ресори з урахуванням термодинаміки пневматичної системи, а також ефективного тертя та в'язко-пружного демпфування гумокордної оболонки пневматичної ресори. Також провели дві групи експериментів у випадку квазістатичного та динамічного збудження. Квазістатичні випробування направлені на дослідження гістерезису сила–деформація пневматичної ресори. Під час цих випробувань частота збудження сягала не більше 0,02 Гц за амплітудами збудження 1, 2, 4 та 8 мм. Під час динамічних випробувань частота збудження перебувала в межах від 0 до 20 Гц за амплітуди збудження 0,5, 1 та 2 мм.

У роботі [16] подано результати експериментальних досліджень пневматичної ресори залізничного рухомого складу. Випробування проведено відповідно до EN13597 за вертикального навантаження 109,8 кН, амплітуди 10 мм та частоти від 0,5 до 10 Гц. На основі методу, запропонованого Док'є [8], проведено дослідження вертикальної динамічної жорсткості пневматичної ресори.

У праці [18] автори розробили динамічну модель вертикальної жорсткості на основі термодинаміки та гідродинаміки. Наближеним аналітичним методом отримано аналітичні розв'язки ефективної площі, еквівалентного об'єму та їх похідні.

У праці [15] автори провели моделювання роботи пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках. У вертикальному напрямку силу реакції пневматичної ресори отримано шляхом введення рівнянь пневматики, а в горизонтальному напрямку використано квадратичну функцію, розраховану методом скінченних елементів. Під час випробувань на вертикальну жорсткість частота збудження змінювалась від 0,5 до 5,0 Гц за амплітуди 2,5, 5,0 і 7,5 мм.

Автори роботи [3] експериментально проаналізували характеристики пневматичної системи ресорного підвішування із врахуванням впливу різних параметрів об'ємів додаткового резервуара, пневморесори, довжини труб та амплітуди. Крім того, досліджено вплив цих елементів на комфортабельність руху. Однак дослідження комфорту проведено шляхом оцінки прискорень у різних місцях кузова, що свідчить про труднощі вибору оптимального коефіцієнта демпфування вторинної підвіски. Також запропоновано вирішення цієї проблеми за рахунок використання клапана з регульованим прохідним перерізом у з'єднанні між пневматичною ресорою та додатковим резервуаром.

У роботі [14] наведено аналітичну модель пневматичної системи ресорного підвішування, яка базується на експериментальних характеристиках ефективної площі та об'єму пневматичної ресори. Установлено, що ефективна площа та об'єм пневматичної ресори майже не залежать від тиску, і важливо те, що обидві функції є близькими до лінійних. З'ясовано, що розміри пневматичної ресори, додаткового резервуара та з'єднувального трубопроводу є найважливішими конструктивними параметрами у визначенні поведінки пневматичної системи ресорного підвішування.

У роботі [12] автори розглянули шість математичних моделей, які описують динамічну поведінку пневматичної системи ресорного підвішування, та провели їх порівняння з експериментальними даними. Під час вимірювань задавали частоти до 20 Гц і амплітуди зміщення до 4 мм. Також розглядали питання комфортабельності руху.

У роботі [7] проведено випробування двох різних типів пневматичних ресор. Алгоритм динамічного аналізу пневматичної ресори складається з двох частин: розрахунок геометричних параметрів пневматичної ресори та моделювання процесу зміни термодинаміки повітря. Випробування проведено, щоб дослідити характеристики пневматичної ресори для різних типів і амплітуд збудження. Відзначено, що основними факторами, які впливають на точність розрахунку, є параметри жорсткості гумокордної оболонки та коефіцієнти теплопередачі.

У працях [9–10] наведено теоретичні результати динамічної роботи пневматичної ресори

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

швидкісного рухомого складу залізниць залежно від геометричних параметрів з'єднувального трубопроводу, а саме співвідношення діаметра і довжини. Установлено, що довжина не значно впливає на динамічні характеристики пневматичної ресори. Значно більший вплив має величина діаметра з'єднувального трубопроводу.

Відтак аналіз літературних джерел показує, що головним чином експериментальні дослідження проведено з метою визначення динамічних характеристик пневматичної системи ресорного підвішування. Нерозв'язаною залишилася задача встановлення закономірностей деформування гумокордної оболонки як окремого конструктивного елемента пневматичної ресори в разі зміни внутрішнього тиску, що сприятиме відтворенню геометричної поведінки пневматичної ресори для змінних експлуатаційних умов.

Статичні експериментальні випробування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізничі за умови підвищення внутрішнього тиску виконано на випробному стенді. Стенд складається із навантажувального пристрою, пневматичної ресори, додаткового резервуара, компресора, датчика сили контролю навантаження, потенціометричних датчиків лінійних переміщень, аналогово-цифрового перетворювача та персонального комп'ютера.

Вигляд експериментальної установки для вимірювання деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори під час закачування повітря (збільшення внутрішнього тиску в ресорі) наведено на рис. 2.

Перед початком вимірювання деформацій гумокордної оболонки пневматичної ресори за допомогою гідравлічного домкрата задано привантаження на ресору величиною 0,12 кН з метою її жорсткого фіксування у вертикальному напрямі. Протягом усього експерименту величина від верхньої пластини ресори до упору гідравлічного домкрата становить  $h_p = 214$  мм і повинна бути сталою.

Програма досліджень деформування гумокордної оболонки передбачала вимірювання деформацій ресори за підвищення тиску в ній ступенями. При цьому зміни величини внутрішнього тиску досягнуто за допомогою компресора високого тиску.

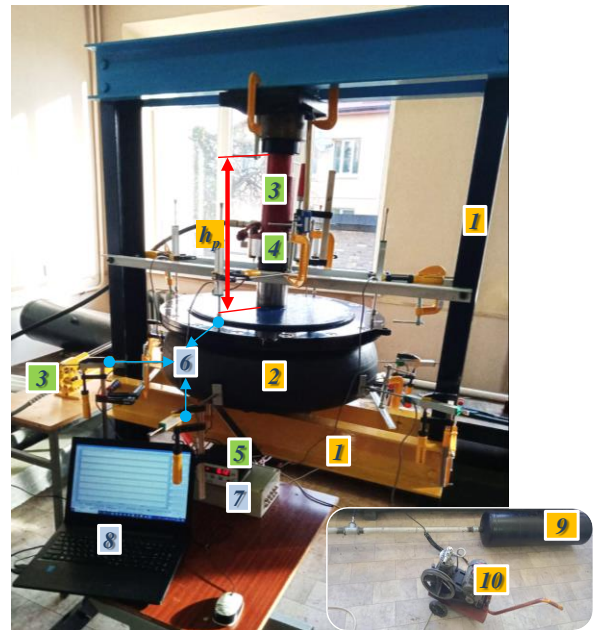


Рис. 2. Експериментальна установка для дослідження деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори:

- 1 – несна конструкція стенда; 2 – пневматична ресора;
- 3 – гідравлічний домкрат; 4 – тензометричний датчик сили; 5 – цифровий зчитувач величини сили;
- 6 – потенціометричні датчики лінійних переміщень;
- 7 – аналогово-цифровий перетворювач;
- 8 – персональний комп'ютер; 9 – додатковий резервуар;
- 10 – компресор високого тиску

Fig. 2. Experimental setup for studying the deformation of the rubber-cord shell of a pneumatic spring:

- 1 – supporting structure of the stand; 2 – pneumatic spring;
- 3 – hydraulic jack; 4 – tensometric force sensor;
- 5 – digital force magnitude reader; 6 – potentiometric sensors of linear movements;
- 7 – analog-digital converter;
- 8 – personal computer; 9 – additional tank;
- 10 – high pressure compressor

Тиск підвищували від 0 до 5,0 атм. із кроком 0,5 атм. На кожному рівні підвищення тиску на 0,5 атм. відбувався запис деформування гумо-кордної оболонки у вертикальному та горизонтальному напрямках із використанням високочастотних датчиків лінійних переміщень. Виміряні дані після зчитування запрограмованим аналогово-цифровим перетворювачем зберігалися в пам'яті персонального комп'ютера.

Вимірювання деформацій гумокордної оболонки пневматичної ресори проведено трьома датчиками лінійних переміщень  $П_1$ – $П_3$  (рис. 3).

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

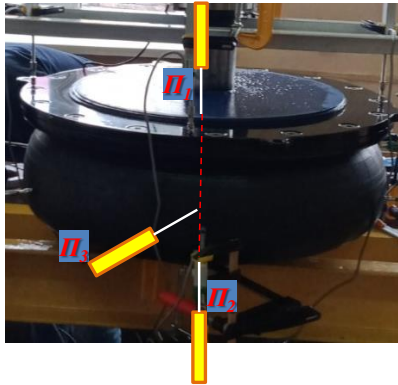


Рис. 3. Схема розташування лінійних датчиків переміщень

Fig. 3. Location diagram of linear movement sensors

Датчик  $P_1$  використано для контролю величини переміщення пневматичної ресори у вертикальному напрямі. За підвищення тиску відбувалося незначне переміщення ресори у вертикальному напрямі через конструктивні особливості несної конструкції випробного стендо, однак для підвищення точності експерименту це необхідно врахувати під час аналізу даних, оскільки величина  $h_p$  має бути постійною в процесі експерименту.

Лінійний датчик переміщень  $P_2$  вимірював вертикальні переміщення гумокордної оболонки пневматичної ресори вниз, датчик  $P_3$  – горизонтальні переміщення гумокордної оболонки.

У результаті отримали значення вертикальних та горизонтальних переміщень гумо-кордної оболонки за підвищення внутрішнього тиску у пневматичній ресорі, що наведено нижче.

### Результати

За допомогою вищенаведеної методики статичних експериментальних досліджень отримано залежності вертикальних та горизонтальних переміщень гумокордної оболонки пневматичної ресори в разі зміни внутрішнього тиску (рис. 4–8).

З аналізу отриманих залежностей встановлено, що деформування гумокордної оболонки за умови збільшення внутрішнього тиску в пневматичній ресорі в горизонтальній площині відбувається інтенсивніше порівняно з вертикальною.

Максимальні значення деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах, залежно

від величини внутрішнього тиску наведено в табл. 1.

Установлено, що максимальні значення деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах дорівнюють 4,478 та 6,830 мм відповідно, що спостерігається на початковому етапі закачування повітря в діапазоні зміни тиску від 0 до 0,5 атм. Під час подальшого збільшення внутрішнього тиску в пневматичній ресорі з кроком 0,5 атм. до максимального значення 5,0 атм. деформування гумокордної оболонки відбувається з меншою інтенсивністю, яка у вертикальній площині перебуває в діапазоні  $7,35 \div 19,4$  % від максимальної величини деформування, а в горизонтальній – у діапазоні  $13,25 \div 24,71$  %.

Таблиця 1

**Максимальні значення деформування гумо-кордної оболонки залежно від величини внутрішнього тиску у пневматичній ресорі**

Table 1

**Maximum deformation values of the rubber cord shell depending on the internal pressure in the pneumatic spring**

Тиск, атм.	Вертикальна площина, мм	Горизонтальна площина, мм
0,5	4,478	6,830
1,0	0,399	1,025
1,5	0,815	1,224
2,0	0,869	1,266
2,5	0,650	1,188
3,0	0,723	1,342
3,5	0,564	1,309
4,0	0,621	1,688
4,5	0,329	0,912
5,0	0,334	1,115

Слід підкреслити, що залежності мають нелінійний характер зміни. Тому для кожного діапазону зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі отримано поліноміальне рівняння, зі ступенем полінома, що дорівнює 6. Такий ступінь дозволить найбільш наближено описати рів-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

няння деформування гумокордної оболонки у вертикальному та горизонтальному напрямках за різних значень тиску в пневматичній ресорі.

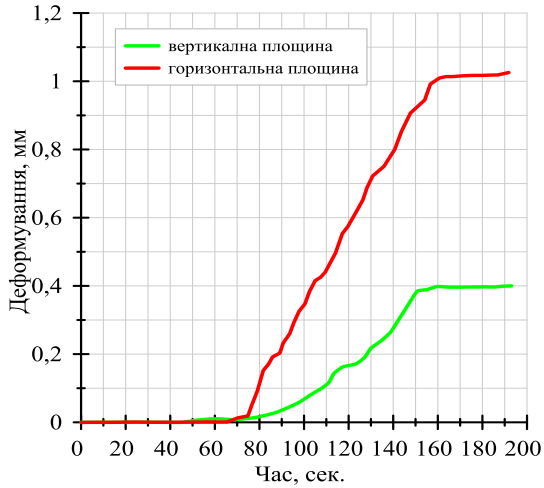


Рис. 4. Залежності вертикальних та горизонтальних переміщень гумокордної оболонки в разі зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 0,5 до 1,0 атм.

Fig. 4. Dependences of vertical and horizontal displacements of the rubber cord shell in the case of changing the internal pressure in the pneumatic spring from 0.5 to 1.0 atm.

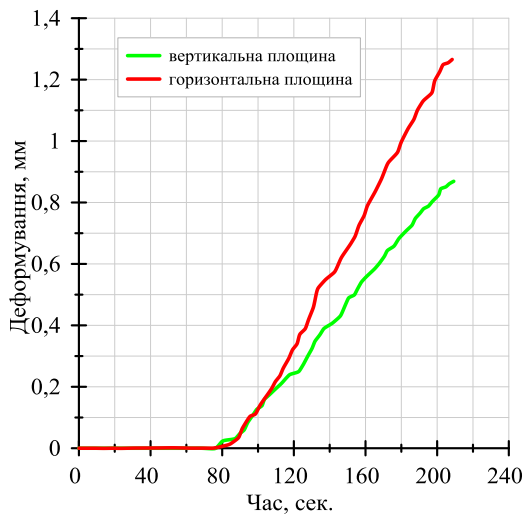


Рис. 5. Залежності вертикальних та горизонтальних переміщень гумокордної оболонки в разі зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 1,5 до 2,0 атм.

Fig. 5. Dependences of vertical and horizontal displacements of the rubber cord shell in the case of changing the internal pressure in the pneumatic spring from 1.5 to 2.0 atm.

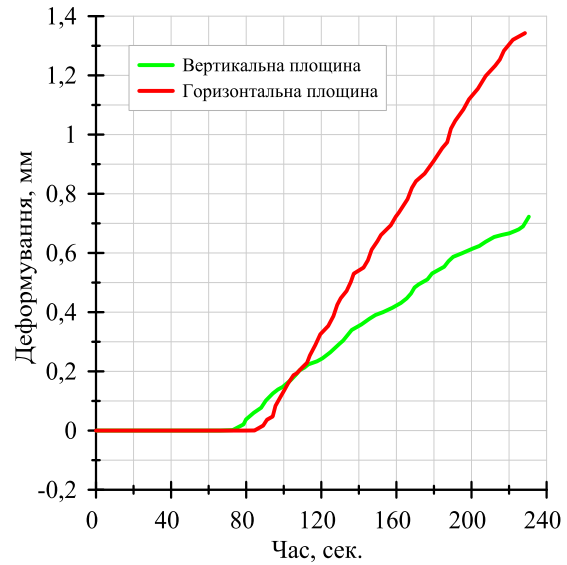


Рис. 6. Залежності вертикальних та горизонтальних переміщень гумокордної оболонки в зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 2,5 до 3,0 атм.

Fig. 6. Dependence of vertical and horizontal displacements of the rubber cord shell on changes in internal pressure in the pneumatic spring from 2.5 to 3.0 atm.

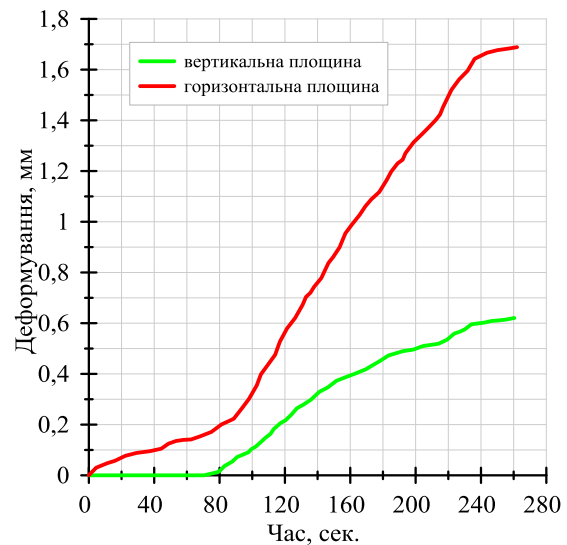


Рис. 7. Залежності вертикальних та горизонтальних переміщень гумокордної оболонки в зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 3,5 до 4,0 атм.

Fig. 7. Dependence of vertical and horizontal displacements of the rubber cord shell on changes in the internal pressure in the pneumatic spring from 3.5 to 4.0 atm.

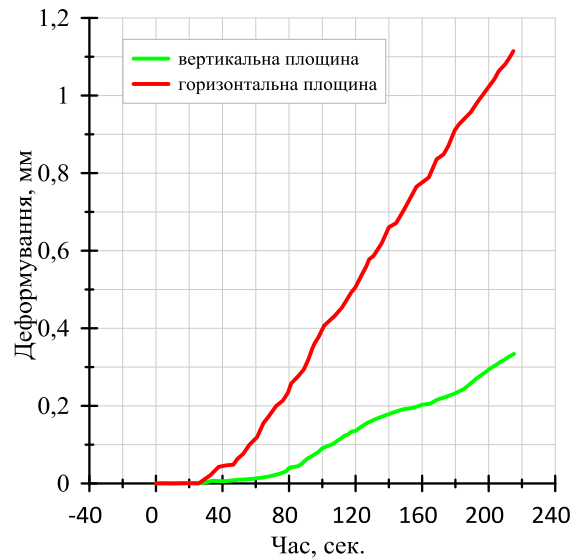


Рис. 8. Залежності вертикальних та горизонтальних переміщень гумокордної оболонки в зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 4,5 до 5,0 атм.

Fig. 8. Dependence of vertical and horizontal displacements of the rubber cord shell on changes in internal pressure in a pneumatic spring from 4.5 to 5.0 atm.

У разі зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 0,5 до 1,0 атм. поліноміальні рівняння для вертикальної площини мають вигляд:

$$z = 5 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 - 3 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 + 7 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 6 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0003 \cdot x^2 - 0,0036 \cdot x + 0,007, \quad (1)$$

а для горизонтальної площини:

$$y = 9 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 - 3 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0003 \cdot x^2 + 0,0052 \cdot x - 0,014. \quad (2)$$

За зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 1,5 до 2,0 атм. поліноміальні рівняння для вертикальної площини мають вигляд:

$$z = 3 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 - 4 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 6 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^2 + 0,0025 \cdot x - 0,0061, \quad (3)$$

а для горизонтальної площини:

$$y = 2 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 - 8 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 9 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 6 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^2 + 0,0027 \cdot x - 0,0108. \quad (4)$$

У випадку зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 2,5 до 3,0 атм. поліноміальні рівняння для вертикальної площини мають вигляд:

$$z = -2 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0002 \cdot x^2 + 0,0041 \cdot x - 0,0111, \quad (5)$$

а для горизонтальної площини:

$$y = -8 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 + 8 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0004 \cdot x^2 + 0,0077 \cdot x - 0,0285. \quad (6)$$

За зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 3,5 до 4,0 атм. поліноміальні рівняння для вертикальної площини мають вигляд:

$$z = -9 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 + 8 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0002 \cdot x^2 + 0,0046 \cdot x - 0,0125, \quad (7)$$

а для горизонтальної площини:

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$y = -2 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 - 5 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 7 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0005 \cdot x^2 + 0,013 \cdot x - 0,0295. \quad (8)$$

У випадку зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі від 4,5 до 5,0 атм. поліноміальні рівняння для вертикальної площини мають вигляд:

$$z = -8 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 + 7 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^2 + 0,0025 \cdot x - 0,008, \quad (9)$$

а для горизонтальної площини:

$$y = -1 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 + 7 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 6 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,0006 \cdot x + 0,0026. \quad (10)$$

Отже, дослідження роботи гумокордної оболонки в разі зміни внутрішнього тиску в пневматичній ресорі на далі дозволить перейти до етапу експериментальних досліджень, що полягатимуть у встановленні закономірностей зміни форми гумокордної оболонки від впливу зовнішнього навантаження, додаткового резервуара та зміни внутрішнього тиску. Отримані значення необхідні для перевірки адекватності математичної моделі роботи пневматичної системи ресорного підвішування, а також для аналізу динамічних показників та показників безпеки руху сучасного швидкісного рухомого складу.

#### Наукова новизна та практична значимість

Експериментальним способом встановлено закономірності деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах за різних значень внутрішнього тиску в пневматичній ресорі. Це дозволить моделювати роботу пневматичної ресори із врахуванням закономірностей деформування гумокордної оболонки та сприятиме достовірнішому визначенню динамічних показників ресори в експлуатаційних умовах. Крім цього, визначені показники можна застосувати під час дослідження динамічних показників пневматичної ресори методом просторового математичного моделювання рухомого складу ще на етапі його проєктування.

#### Висновки

1. Розроблено методику статичних експериментальних досліджень деформування гумокордної оболонки у вертикальній та горизонтальній площинах у разі підвищення внутрішнього тиску в пневматичній ресорі.

2. Отримано залежності та поліноміальні рівняння деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниць у вертикальному та горизонтальному напрямках за різних значень внутрішнього тиску. Виявлено, що деформування гумокордної оболонки в разі збільшення внутрішнього тиску в пневматичній ресорі в горизонтальному напрямку відбувається інтенсивніше порівняно з вертикальним.

3. Встановлено, що максимальні значення деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках спостерігаються на початковому етапі закачування повітря в діапазоні зміни тиску від 0 до 0,5 атм. та становлять 4,478 та 6,830 мм відповідно. Відзначено, що поступове збільшення внутрішнього тиску в пневматичній ресорі призводить до менш інтенсивного деформування гумокордної оболонки, яке у вертикальному напрямку перебуває в діапазоні 7,35÷19,4 % від максимальної величини деформування, а в горизонтальному – у діапазоні 13,25÷24,71 %.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каспакбаев К. С., Карпов А. П., Курмангалиев К. Ш. Конструктивные особенности резинокордных упругих элементов. *Промышленный транспорт Казахстана*. 2016. № 1 (50). С. 28–31.
2. Кузишин А. Я., Кострица С. А., Соболевська Ю. Г., Батіг А. В. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4 (94). С. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974>
3. Alonso A., Gimenez J. G., Nieto J., Vinolas J. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Iss. sup1. P. 271–286. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258>

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Berg M. A model for rubber springs in the dynamic analysis of rail vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 1997. Vol. 211. Iss. 2. P. 95–108. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954409971530941>
5. Berg M. A Non-Linear Rubber Spring Model for Rail Vehicle Dynamics Analysis. *Vehicle System Dynamics*. 1998. Vol. 30. Iss. 3–4. P. 197–212. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423119808969447>
6. Berg M. A Three-Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*. 1999. Vol. 33. Iss. sup1. P. 528–539. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>
7. Chang F., Lu Z.-H. Dynamic model of an air spring and integration into a vehicle dynamics model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2008. Vol. 222. Iss. 10. P. 1813–1825. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO867>
8. Docquier N., Fiset P., & Jeanmart H. Multiphysics modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45. Iss. 6. P. 505–524. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>
9. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sobolevska Yu. Studying the diagrams «force – deformation» of a pneumatic spring of a modern rolling stock at increased speeds. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004006>
10. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Stankevych V., Hilevych V. Determining patterns in the influence of the geometrical parameters of the connecting pipeline on the dynamic parameters of the pneumatic spring of railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 1, No 7 (121). P. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274180>
11. Kuzyshyn A., Sobolevska J., Kostritsa S., Batig A., Boiarko V. Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock. *AIP Conference Proceedings* (Kharkiv, 17–19 Nov. 2021). Kharkiv, 2023. Vol. 2684. Iss. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1063/12.0013715>
12. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014. Vol. 228. Iss. 3. P. 225–241. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641>
13. Nakajima T., Shimokawa Y., Mizuno M., Sugiyama H. Air Suspension System Model Coupled With Leveling and Differential Pressure Valves for Railroad Vehicle Dynamics Simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 9. Iss. 3. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026275>
14. Nieto A., Morales A., González A. An analytical model of pneumatic suspensions based on an experimental characterization. *Journal of Sound and Vibration*. 2008. Vol. 313. Iss. 1–2. P. 290–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.11.027>
15. Qi Z., Li F., Yu D. A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. Iss. 1. P. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715620534>
16. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes length and diameter on the air spring behavior in rail vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering*. 2010. Vol. 34, No B5. P. 499–508.
17. Tanaka T., Sugiyama H. Prediction of railway wheel load unbalance induced by air suspension leveling valves using quasi-steady curve negotiation analysis procedure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. 2019. Vol. 234. P. 19–37. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464419319867179>
18. Xu L. Mathematical modeling and characteristic analysis of the vertical stiffness for railway vehicle air spring system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 220. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>
19. Zhu H., Yang J., Zhang Y., Feng X. A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. Vol. 408. P. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.015>

A. YA. KUZYSHYN<sup>1\*</sup>, V. V. KOVALCHUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. (032) 267 99 74, e-mail [kuzyshyn1993@gmail.com](mailto:kuzyshyn1993@gmail.com), ORCID 0000-0002-3012-5395

<sup>2</sup>Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. (032) 267 99 74, e-mail [kovalchuk.diit@gmail.com](mailto:kovalchuk.diit@gmail.com), ORCID 0000-0003-4350-1756

## Experimental Study of the Regularities of Deformation of the Rubber Cord Shell of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock

**Purpose.** The aim of this work is to establish the regularities of deformation of the rubber cord shell in the vertical and horizontal directions in the case of changes in the internal pressure in the pneumatic spring by static experimental studies. **Methodology.** A static test bench was used to establish the regularities of deformation of the rubber cord shell of a pneumatic spring. Changes in the internal pressure in the pneumatic spring were achieved using a compressor, and the deformation of the rubber cord shell was measured directly by high-frequency potentiometric linear displacement sensors. The deformation of the rubber cord shell of a pneumatic spring in both the vertical and horizontal planes was studied under the condition of changing the internal pressure in the spring in the range from 0 to 5 atm. **Findings.** Using the designed test bench, a methodology for experimental studies of the deformation of a rubber cord shell with increasing internal pressure in a pneumatic spring was developed. The dependences of the deformation value of the rubber cord casing of a pneumatic spring when the internal pressure changes in the range of 0–5.0 atm were obtained. It is established that the deformation of the rubber cord casing with an increase in the internal pressure in the pneumatic spring in the horizontal plane is more intense compared to the vertical plane. It is found that the maximum values of deformation of the rubber cord shell of a pneumatic spring in the vertical and horizontal directions are observed at the initial stage of air injection in the range of pressure changes from 0 to 0.5 atm. The polynomial equations describing the deformation dependences of the rubber cord shell of a pneumatic spring were obtained. **Originality.** The regularities of deformation of the rubber cord casing in the vertical and horizontal planes at different values of the internal pressure in the pneumatic spring were determined by experimental static studies. **Practical value.** The study of the regularities of deformation of the rubber cord shell will contribute to a more accurate modeling of the operation of the pneumatic spring and a reliable determination of its dynamic performance. This will make it possible to use the dynamic performance of the air spring in the spatial mathematical model of the rolling stock at the design stage, as well as to evaluate its dynamic performance and traffic safety indicators.

**Keywords:** air spring; rubber cord shell; deformation; pressure; potentiometric linear displacement sensor

### REFERENCES

1. Kaspakbaev, K. S., Karpov, A. P., & Kurmangaliev, K. Sh. (2016). Konstruktivnye osobennosti rezinokordnykh uprugikh elementov. *Promyshlennyy transport Kazakhstana*, 1(50), 28-31. (in Russian)
2. Kuzyshyn, A. Y., Kostritsia, S. A., Sobolevska, Yu. H., & Batih, A. V. (2021). World Experience in Creating Mathematical Models of Air Springs: Advantages and Disadvantages. *Science and Transport Progress*, 4(94), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974> (in Ukrainian)
3. Alonso, A., Giménez, J. G., Nieto, J., & Vinolas, J. (2010). Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice. *Vehicle System Dynamics*, 48(sup1), 271-286. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258> (in English)
4. Berg, M. (1997). A model for rubber springs in the dynamic analysis of rail vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 211(2), 95-108. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954409971530941> (in English)
5. Berg, M. (1999). A Three-Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*, 33(sup1), 528-539. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109> (in English)
6. Berg, M. (1998). A Non-Linear Rubber Spring Model for Rail Vehicle Dynamics Analysis. *Vehicle System Dynamics*, 30(3-4), 197-212. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423119808969447> (in English)
7. Chang, F., & Lu, Z.-H. (2008). Dynamic model of an air spring and integration into a vehicle dynamics model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222(10), 1813-1825. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070jauto867> (in English)
8. Docquier, N., Fisette, P., & Jeanmart, H. (2007). Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*, 45(6), 505-524. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848> (in English)
9. Kuzyshyn, A., Kovalchuk, V., & Sobolevska, Y. (2024). Studying the diagrams «force – deformation» of a pneumatic spring of a modern rolling stock at increased speeds. *MATEC Web of Conferences*, 390, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004006> (in English)
10. Kuzyshyn, A., Kovalchuk, V., Stankevych, V., & Hilevych, V. (2023). Determining patterns in the influence of the geometrical parameters of the connecting pipeline on the dynamic parameters of the pneumatic spring

- of railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(121)), 57-65.  
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274180> (in English)
11. Kuzyshyn, A., Sobolevska, J., Kostritsa, S., Batig, A., & Boiarko, V. (2023). Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2684, Iss. 1, pp. 1-7). Kharkiv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1063/12.0013715> (in English)
  12. Mazzola, L., & Berg, M. (2012). Secondary suspension of railway vehicles - air spring modelling: Performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(3), 225-241. <https://doi.org/10.1177/0954409712470641> (in English)
  13. Nakajima, T., Shimokawa, Y., Mizuno, M., & Sugiyama, H. (2014). Air Suspension System Model Coupled With Leveling and Differential Pressure Valves for Railroad Vehicle Dynamics Simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 9(3), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026275> (in English)
  14. Nieto, A. J., Morales, A. L., González, A., Chicharro, J. M., & Pintado, P. (2008). An analytical model of pneumatic suspensions based on an experimental characterization. *Journal of Sound and Vibration*, 313(1-2), 290–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.11.027> (in English)
  15. Qi, Z., Li, F., & Yu, D. (2016). A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(1), 3-18. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715620534> (in English)
  16. Sayyaadi, H., & Shokouhi, N. (2010). Effects of air reservoir volume and connecting pipes length and diameter on the air spring behavior in rail vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering*, 34(B5), 499-508. (in English)
  17. Tanaka, T., & Sugiyama, H. (2019). Prediction of railway wheel load unbalance induced by air suspension leveling valves using quasi-steady curve negotiation analysis procedure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 234(1), 19-37. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464419319867179> (in English)
  18. Xu, L. (2020). Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of the Vertical Stiffness for Railway Vehicle Air Spring System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563> (in English)
  19. Zhu, H., Yang, J., Zhang, Y., & Feng, X. (2017). A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*, 408, 87-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.015> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.02.2024

Прийнята до друку: 14.06.2024

**УДК 629.424**

Є. С. РЯБОВ<sup>1\*</sup>, Б. Х. ЄРЩЯН<sup>2</sup>, І. М. КОЛОДІЙ<sup>3</sup>, С. В. ІВАНОВ<sup>4</sup>, О. А. СИЧ<sup>5</sup>,  
А. В. ГАЛИЧ<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

<sup>2</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

<sup>3</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта ivan.kolodii@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0001-9583-2787

<sup>4</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта stanislav.v.ivanov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0004-0190-1609

<sup>5</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта oleh.sych@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-2720-2460

<sup>6</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта anastasiia.halych@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0006-7912-2802

## Підвищення паливної ефективності магістрального тепловоза з роздільним навантаженням секцій

**Мета.** У статті передбачено дослідити підвищення паливної ефективності магістрального вантажного тепловоза при застосуванні роздільного навантаження дизель-генераторів окремих секцій. **Методика.** Дослідження проведено для неелектрифікованої ділянки між станціями Харків–Сортувальний та Суми під час руху вантажного поїзда із 45 навантаженими та порожніми вантажними вагонами в обох напрямках. Розглянуто рух поїзда з вантажним магістральним двосекційним тепловозом 2ТЕ116. Для визначення параметрів руху розроблено математичну модель, за допомогою якої вирішено серію тягових задач. Виконано розрахунки для випадків руху поїзда із серійним тепловозом та тепловозом, на якому застосовано роздільне навантаження дизель-генераторів його окремих секцій. Для проведення моделювання запропоновано спосіб навантаження секцій та побудовано тягові характеристики тепловоза відповідно до цього способу. **Результати.** Встановлено, що застосування роздільного навантаження дизель-генераторів окремих секцій тепловоза під час руху поїзда з навантаженими вагонами забезпечує зниження споживання пального на 18,7...19,6 % порівняно з рухом із серійним тепловозом. Для випадку руху поїзда з порожніми вагонами зниження споживання пального складає 8,1...10,3 % порівняно з рухом із серійним тепловозом. З'ясовано, що рух поїзда з порожніми вагонами може здійснюватися з тягою однією секцією тепловоза. У цьому випадку зниження споживання пального складає 29,5...31,0 %. У всіх досліджуваних випадках тривалість руху є практично однаковою. **Наукова новизна.** Автори цієї роботи розв'язали тягові задачі для реальної ділянки колії під час руху поїзда з вантажним тепловозом, на якому застосовано роздільне навантаження дизель-генераторів його секцій. Запропоновано спосіб формування тягових характеристик тепловоза за роздільного навантаження дизель-генераторів. **Практична значимість.** Розроблені математичні моделі руху поїзда, у тому числі для випадку роздільного навантаження дизель-генераторів секцій тепловоза, можна застосувати під час модернізації тепловозів чи створенні дизельного рухомого складу із застосування багатодизельної силової енергетичної установки.

*Ключові слова:* рухомий склад; локомотив; паливна ефективність; енергозбереження

### Вступ

Основні магістральні шляхи АТ «Укрзалізниця» є електрифікованими лініями. Це забезпечує низьку вартість перевезень та потенціал для подальшого розвитку транзитних перевезень [6, 18]. Водночас на значній частині залізничних ділянок, які підходять до цих транспортних коридорів, портів, логістичних терміналів тощо, передбачено тепловозну тягу. Невеликі обсяги перевезень по цих ділянках роблять недоцільною їх електрифікацію навіть за умов постійного зростання вартості паливно-мастильних матеріалів. Тому для таких ліній необхідне застосування сучасних або модернізованих тепловозів, внаслідок чого буде досягнуто зменшення експлуатаційних витрат та зниження негативного впливу на довкілля.

Для оновлення парку магістральних вантажних тепловозів АТ «Укрзалізниця» було здійснено закупівлю тепловозів ТЕ33А «Тризуб», які є адаптованою для колії 1 520 мм версією тепловоза Evolution ES44ACi [14] (рис. 1, *a*). Перевагами нового тепловоза є зменшене споживання

паливного, мастила, збільшені терміни між обслуговуваннями, нижчі шкідливі викиди, поліпшення умов праці локомотивної бригади тощо. Також новий тепловоз має суттєво вищі тягові характеристики порівняно з наявними тепловозами, що дозволяє підвищити ефективність процесу перевезень.

Іншим варіантом оновлення, який широко застосовують для поліпшення парку локомотивів, є модернізація тепловозів. Її перевага полягає в нижчій вартості порівняно з придбанням нових локомотивів. Шляхом модернізації оновлено тепловозний парк державних залізниць та приватних перевізників у країнах Балтії та Східної Європи. АТ «Укрзалізниця» у 2011 році модернізувала тепловози М62 (рис. 1, *б*) із застосуванням обладнання виробництва General Motors. ПрАТ «Полтавський тепловозоремонтний завод» модернізував тепловози 2ТЕ10М (рис. 1, *в*) з використанням силового модуля SuperSkid від GE [9]. Модернізація забезпечила зниження споживання пального, зменшила витрату мастила тощо. Однак через збереження оригінальних тягових електродвигунів тягові властивості тепловозів майже не поліпшилися.

*a – a**б – б**в – в*

Рис. 1. Магістральні вантажні тепловози:

*a* – тепловоз ТЕ33А «Тризуб»; *б* – модернізований тепловоз М62; *в* – модернізований тепловоз 2ТЕ10

Fig. 1. Main freight diesel locomotives:

*a* – TE33A “Trizub” diesel locomotive; *b* – modernized M62 diesel locomotive; *c* – modernized 2TE10 diesel locomotive

Важливим напрямом оновлення тягового рухомого складу є впровадження технологій, які дозволяють знизити споживання паливно-енергетичних ресурсів. Ключовим тут є застосуванням енергооптимального руху поїздів, яке у випадку тепловозної тяги передбачає оптимізацію керування з метою зниження споживання пального [1,4,8]. Додатково знизити споживання пального можна за допомогою застосування багатодизельної або гібридної силової енергетичної

установки [17], упровадження керування багатодвигунним тяговим електроприводом відповідно до поточного рівня навантаження [16], застосування енергоефективного керування допоміжними системами локомотива. Варто відзначити, що вказане можна реалізувати у випадку докорінної модернізації тепловозів. На наявному тяговому рухомому складі чи не єдино можливим способом є оптимізація керування сило-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вими енергетичними установками багатосекційних тепловозів.

Схожий спосіб керування застосовано на тепловозах і локомотивах ALP–45DP (рис. 2, *a*) виробництва Bombardier Transportation [11], EURO9000 (рис. 2, *b*) виробництва Stadler [19], на тепловозі DF200 (рис. 2, *в*), який експлуатує компанія JR Freight [15]. Ці локомотиви обладнано дводизельними силовими енергетичними установками. Роздільне навантаження дизель-генераторів також застосовано на тепловозі Traxx DE ME (рис. 2, *г*) (виробник – Bombardier Transportation), який має чотиридизельну силову енергетичну установку [12].

Ефективний підхід – роздільне навантаження дизель-генераторів двосекційного тепловоза – було застосовано на тепловозі 2TE116 № 1360, за результатами експлуатаційних випробувань якого зафіксовано зниження споживання пального на 10,6 %. Вочевидь, що передбачене у [5] застосування посекційного регулювання режимів експлуатації для оновлення тепловозів 2TE116, які експлуатують на лініях АТ «Укрзалізниця», спирається на цей досвід. Однак вбачаємо за доцільне дослідити ефективність роздільного навантаження секцій в умовах реальної ділянки вітчизняної залізниці.

*a – a**b – b**в – в**г – г*

Рис. 2. Локомотиви з багатодизельними силовими енергетичними установками:  
*a* – локомотив ALP–45DP; *b* – локомотив EURO9000; *в* – тепловоз DF200; *г* – тепловоз Traxx DE ME

Fig. 2. Locomotives with multi-diesel power plants:

*a* – locomotive ALP–45DP; *b* – locomotive EURO9000; *c* – diesel locomotive DF200; *d* – diesel locomotive Traxx DE ME

### Мета

Основною метою статті є дослідження ефективності застосування роздільного навантаження дизель-генераторів магістрального двосекційного тепловоза для зменшення споживання пального.

Для досягнення мети передбачено такі задачі:

– визначити параметри руху поїзда із серійним тепловозом;

– визначити параметри руху поїзда з тепловозом, на якому застосовано роздільне навантаження секцій.

### Методика

*Математична модель.* Найбільш експлуатованими на українських залізницях є вантажні магістральні двосекційні тепловози 2TE116, вироблені ПАТ «Луганськтепловоз» (Луганськ, Україна) (рис. 3). Конструкція тепловоза описана у [2, 5].



Рис. 3. Загальний вигляд тепловоза 2ТЕ116

Fig. 3. General appearance of the 2TE116 diesel locomotive

Для дослідження багатьох процесів у системах залізничного транспорту доцільно застосувати математичне моделювання [10, 13]. Математичне моделювання руху поїзду передбачає визначення параметрів руху – тривалості руху, швидкості, витрати енергетичних ресурсів тощо. Для досліджуваного випадку взято, що поїзд моделюють у вигляді ланцюга твердих тіл, з'єднаних жорстким зв'язком [16]. Це підвищує точність розрахунку сил опору.

Математичну модель руху поїзда описують такою системою рівнянь [1, 7]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{\rho}(f_L - w - b); \\ \frac{dS}{dt} = v, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт, який враховує одиниці вимірювання;  $v$  – швидкість;  $t$  – час;  $S$  – пройдений шлях;  $\rho$  – коефіцієнт обертових мас;  $f_L$  – питома дотична сила тяги тепловоза;  $w$  – питомий опір рухові;  $b$  – питоме дотичне зусилля пневматичних гальм.

Питому дотичну силу тяги тепловоза визначаємо за виразом:

$$f_L = \frac{F_L}{\sum_{k=1}^s M_{Lk} + \sum_{j=1}^n M_{Wj}}, \quad (2)$$

де  $F_L$  – дотична сила тяги тепловоза;  $M_{Lk}$  – маса секції тепловоза, що становить 138 т;  $S$  – кількість секцій, що становить 2;  $M_{Wj}$  – маса одного

вагона, що становить 84 т для навантаженого вагона та 23 т для порожнього вагона;  $n$  – кількість вагонів.

Основний питомий опір рухові поїзда визначався за виразом:

$$w = w_o + w_i + w_r + w_s, \quad (3)$$

де  $w_o$  – основний питомий опір рухові поїзда;  $w_i$  – додатковий питомий опір рухові від ухилу;  $w_r$  – додатковий питомий опір під час руху у кривій ділянці колії;  $w_s$  – додатковий питомий опір під час рушання.

Зміну опору в разі зміни атмосферних умов не враховано.

Основний питомий опір рухові поїзда визначається за [10] з використанням залежностей для розрахунку питомого опору рухові тепловозу і вагонів.

У [2] наведено емпіричні вирази для розрахунку основного питомого опору під час руху дво-секційного тепловоза. З урахуванням дослідження режимів роботи, коли одна секція перебуває в режимі тяги, а інша – без навантаження, вираз для основного питомого опору рухові тепловоза має вигляд:

$$w_L = \frac{N}{S} (17,2 + 0,044V + 0,0026V^2) + \left(1 - \frac{N}{S}\right) (20,5 + 0,18V + 0,0034V^2), \quad (4)$$

де  $N$  – кількість секцій, які працюють під навантаженням;  $V$  – швидкість руху, виражена у км/год.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Основний питомий опір чотирирівсних піввагонів на безланковій колії визначаємо за [10]:

$$w_w = \left( 0,7 + \frac{3 + 0,09V + 0,002V^2}{q_0} \right) g, \quad (5)$$

де  $q_0$  – навантаження на вісь, виражене у тонах;  $g$  – прискорення вільного падіння, що дорівнює  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

У разі розрахункової маси навантаженого вагона 84 т осьове навантаження становить 21 т.

У випадку руху порожнього вагона (або з осьовим навантаженням менше ніж 6 т, основний питомий опір розраховуємо за виразом [10]:

$$w_{wx} = 3 + 0,1V + 0,0025V^2. \quad (6)$$

Додатковий опір під час руху від ухилу визначаємо так:

$$w_i = ig, \quad (7)$$

де  $i$  – ухил ділянки, виражений у тисячних.

Опір від руху по кривій ділянці колії визначаємо за виразом [10]:

$$w_r = \frac{700}{R} g, \quad (8)$$

де  $R$  – радіус кривої.

Додатковий опір у випадку рушання визначаємо за виразом [10]:

$$w_s = \frac{28}{q+7} g, \quad (9)$$

де  $q$  – навантаження на вісь одиниці рухомого складу, виражене у тонах.

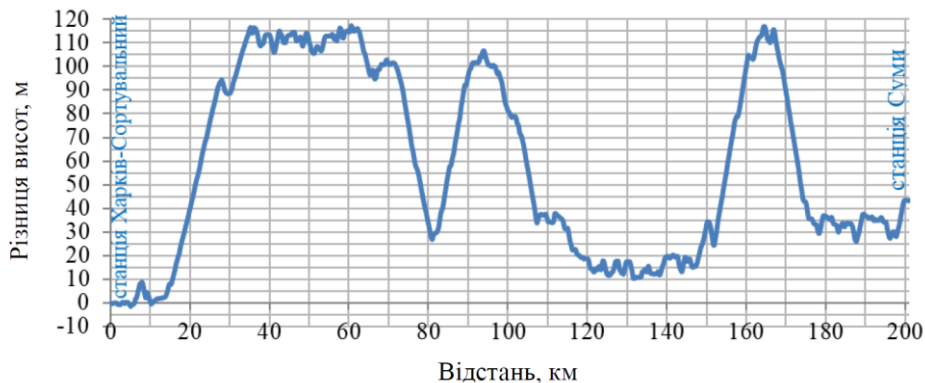


Рис. 4. Профіль колії (створено авторами)

Fig. 4. Track profile (created by the authors)

Керування силою тяги тепловоза здійснюється шляхом зміни позиції контролера машиніста. Система керування, яка задає силу тяги та гальмування, функціонує таким чином, щоб підтримувати допустиму швидкість руху на ділянці. Зупинне гальмування здійснюється в кінці руху на ділянці довжиною 1 500 м.

Розрахунок витрати пального виконано за виразом [2]:

$$G = \sum_{i=1}^K g_i \tau_i + g_0 \tau_0, \quad (10)$$

де  $i$  – номер позиції контролера машиніста у тягових режимах;  $g_i$  – питома витрата пального на  $i$ -й позиції контролера машиніста;  $\tau_i$  – загальна тривалість роботи дизеля на  $i$ -й позиції контролера машиніста;  $g_0$  – питома витрата пального в режимі холостого ходу;  $\tau_0$  – загальна тривалість роботи дизеля в режимі холостого ходу;  $K$  – загальна кількість позицій контролера машиніста.

Вирази (1) – (10) складають математичну модель руху поїзда.

## Результати

Визначення параметрів руху поїзда проведено для ділянки між станціями Харків-Сортувальний та Суми Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця». Довжина ділянки – 201 км. Профіль показано на рис. 4. Досліджено рух в обох напрямках.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Моделювання руху із серійним тепловозом. «Базовим» варіантом є рух поїзда із серійним тепловозом 2ТЕ116. На рис. 5 показано тягові характеристики двосекційного тепловоза [10]. У табл. 1 наведено витрати пального на гіпербо-

лічних ділянках тягових характеристик [2]. Керування тепловозом відповідає штатній роботі і забезпечує ідентичне навантаження дизель-генераторів обох секцій.

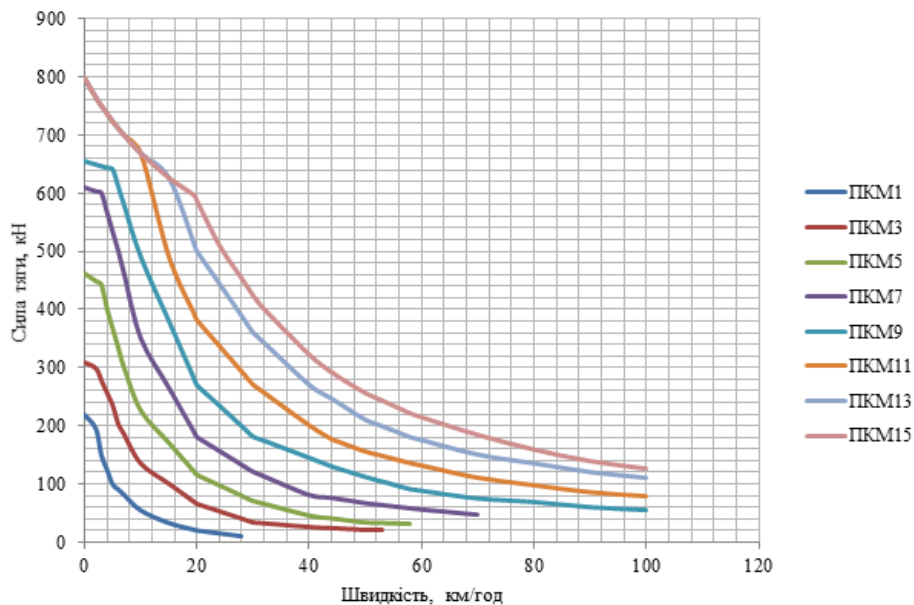


Рис. 5. Тягові характеристики двосекційного тепловоза 2ТЕ116 на непарних позиціях контролера машиніста

Fig. 5. Traction characteristics of a two-section diesel locomotive 2TE116 at odd positions of the driver's controller

Таблиця 1

## Характеристика витрати палива двосекційним тепловозом 2ТЕ116

Table 1

## Characteristics of fuel consumption by two-section diesel locomotive 2TE116

Позиція контролера машиніста	0	1	3	5	7	9	11	13	15
Потужність дизелів, кВт	2×33	2×180	2×415	2×670	2×990	2×1 320	2×1 660	2×2 000	2×2 250
Витрата пального двома дизелями, кг/хв	0,66	1,6	3,3	4,8	6,8	9,0	10,9	13,5	17,0

Розрахунки проведено для допустимої швидкості руху 60 км/год, що відповідає реальним швидкостям руху вантажних поїздів на ділянці. Для розрахунку взято поїзд масою 4 056 т з 45 навантаженими вагонами (це відповідає ваговій

нормі для тепловоза 2ТЕ116) та 1 311 т з 45 порожніми вагонами. Маса тепловоза складає 276 т. Моделювання проведено для руху в обох напрямках. Результати розрахунків наведено в табл. 2. На рис. 6 і 8 показано часові залежності

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

швидкості та дотичної потужності для руху від станції Харків–Сортувальний до станції Суми.

Із рис. 6 і 7 випливає, що рух здійснюється з допустимою швидкістю. Для випадку руху з навантаженими вагонами має місце зниження швидкості на підйомах. Для руху з навантаженими вагонами дотична потужність переважно

відповідає номінальній потужності тепловоза. Під час руху з порожніми вагонами дотична потужність набуває проміжних значень відповідно до тягових характеристик тепловоза. Для зворотного напрямку – від станції Суми до станції Харків–Сортувальний – залежності швидкості і сили тяги подібні до зображених на рис. 6 і 7.

Таблиця 2

**Результати розрахунку параметрів руху на ділянці  
Харків–Сортувальний – Суми із серійним тепловозом 2ТЕ116**

Table 2

**The results of the calculation of traffic parameters on the  
Kharkiv–Sortuvallyny – Sumy section with the 2TE116 serial diesel locomotive**

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми		Суми – Харків–Сортувальний	
	Навантажений поїзд	Порожній поїзд	Навантажений поїзд	Порожній поїзд
Тривалість руху, с	13 264	12 483	13 163	12 448
Витрата пального, кг	1 726	837	1 611	780

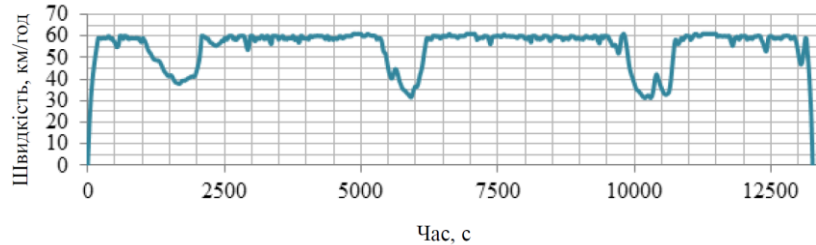
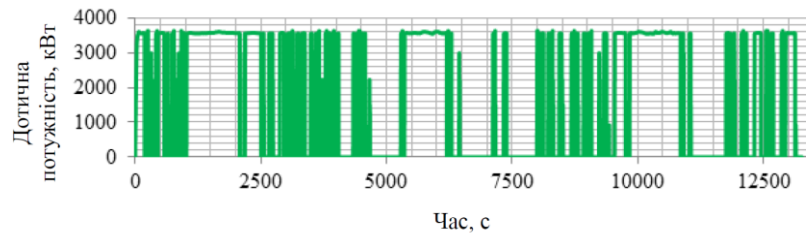
*a – a**b – b*

Рис. 6. Часова залежність швидкості (*a*) та дотичної потужності тепловоза (*b*) під час руху поїзда з навантаженими вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми

Fig. 6. Time dependence of the speed (*a*) and tangential power of the diesel locomotive (*b*) during the movement of a train with loaded wagons from the Kharkiv–Sortuvallyny station to the Sumy station

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

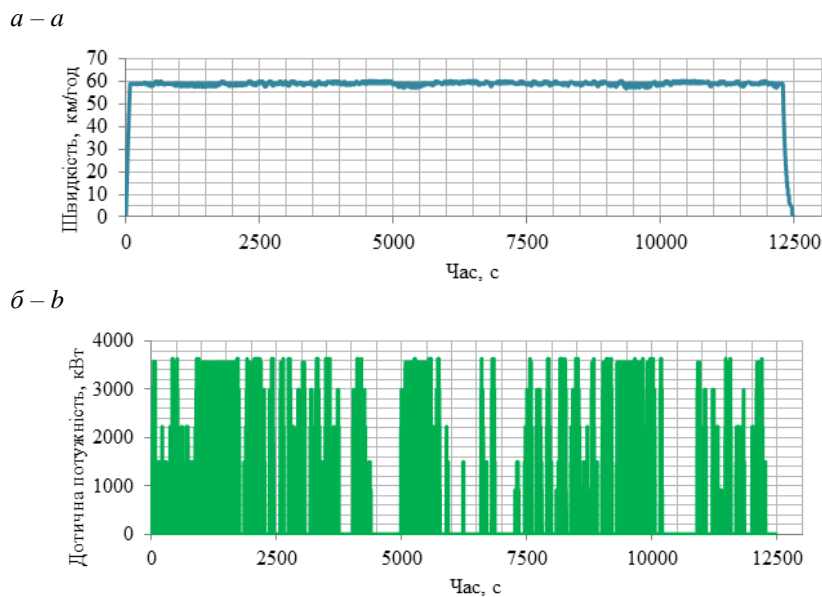


Рис. 7. Часова залежність швидкості (а) та дотичної потужності тепловоза (б) під час руху поїзда з порожніми вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми

Fig. 7. Time dependence of the speed (a) and the tangential power of the diesel locomotive (b) during the movement of the train with empty wagons from the Kharkiv–Sortuvanny station to the Sumy station

Моделювання руху за роздільного навантаження секцій тепловоза. Для досліджуваного випадку керування дизель-генераторами використано такий алгоритм навантаження секцій. Під час рушання і розгону навантаження дизель-генераторів секцій здійснюється як у серійному тепловозі – дизель-генератори навантажуються однаково. Тягові характеристики та характеристики витрати пального відповідають серійному тепловозу. Після досягнення встановленої швидкості руху починає діяти алгоритм роздільного навантаження секцій. Перехід може здійснюватися автоматично або в ручному режимі. Для позицій контролера машиніста з 1 по 8 навантажуються ведуча секція, а ведена секція працює на холостому ході. Фактично тягово-енергетичні характеристики тепловоза відповідають характеристикам однієї секції. У випадку постановки контролера машиніста на 9 позицію і вище дизель-генератори обох секцій навантажуються однаково. Тягово-енергетичні характеристики відповідають серійному тепловозу. Потужність ведучої та веденої секції встановлена відповідно до табл. 3. У цій же таблиці наведено витрату пального. Тягові характеристики тепловоза за роздільного навантаження показано на рис. 8. Ва-

рто зазначити, що в цьому дослідженні використано дещо обмежені дані щодо серійного тепловоза. Однак для оцінних розрахунків вважаємо це допустимим.

Аналіз залежностей на рис. 9 і 10 показує, що рух поїзда здійснюється з допустимою швидкістю. Порівняння часових залежностей із відповідними залежностями на рис. 6 і 7 показує їх високий збіг. Водночас за досліджуваного способу керування витрата пального зменшується. Незначну зміну тривалості руху можна пояснити похибкою моделювання.

*Тяга однією секцією.* Варіантом керування тепловозом із роздільним навантаженням секцій є тяга однією секцією. Дизель-генератор іншої секції може працювати на холостому ході або бути зупиненим. Попередні розрахунки показали, що для досліджуваної ділянки можливий рух однією секцією з порожніми вагонами. Результати розрахунку для цього випадку наведено в табл. 5, при цьому взято, що дизель-генератор другої секції зупинено. На рис. 11 показано залежності швидкості та дотичної потужності під час руху від станції Харків–Сортувальний до станції Суми. Аналіз залежностей на рис. 11 показує, що поїзд рухається з до-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

пустимою швидкістю. Під час руху на підйом відбувається зниження швидкості. Водночас зменшується споживання пального як порівняно з випадком руху із серійним тепловозом, так і порівняно з випадком руху із тепловозом з розділь-

ним навантаженням секцій. У табл. 6 і 7 наведено результати порівняння параметрів руху для різних способів керування навантаженням секцій тепловоза. За базові показники взято параметри руху із серійним тепловозом з ідентичним керуванням обома секціями.

Таблиця 3

## Потужність тепловоза за роздільного навантаження секцій

Table 3

## Locomotive power at separate section loading

Позиція контролера машиніста	0	1	2	3	4	5	6	7	9	11	13	15
Потужність дизеля ведучої секції, кВт	33	80	415	670	990	1 320	1 660	2 000	1 320	1 660	2 000	2 250
Потужність дизеля веденої секції, кВт	33	0	0	0	0	0	0	0	1 320	1 660	2 000	2 250
Витрата пального ведучою секцією, кг/хв	0,33	0,8	1,7	2,4	3,4	4,5	5,9	6,8	4,5	5,9	6,8	8,5
Витрата пального веденою секцією, кг/хв	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	4,5	5,9	6,8	8,5
Витрата пального тепловозом, кг/хв	0,66	1,13	2,03	2,73	3,73	4,83	6,23	7,13	9,0	11,8	13,6	17,0

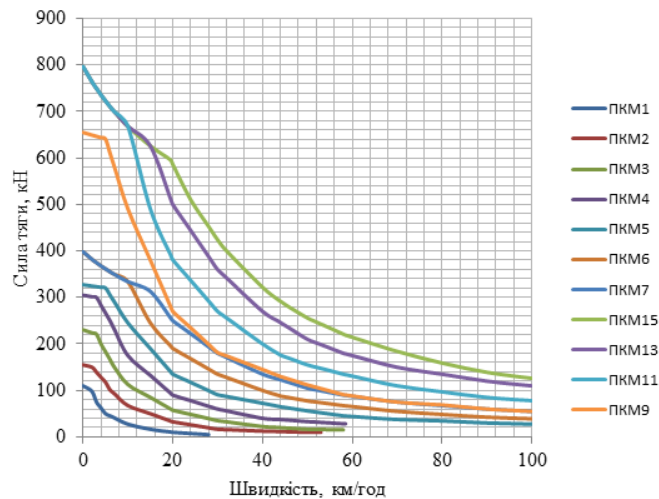


Рис. 8. Тягові характеристики тепловоза за роздільного навантаження секцій (ПКМ – позиція контролера машиніста)

Fig. 8. Traction characteristics of a diesel locomotive with separate loading of sections (ПКМ – position of the driver's controller)

Таблиця 4

## Результати розрахунку параметрів руху на ділянці Харків–Сортувальний – Суми

Table 4

## The results of the calculation of traffic parameters on the Kharkiv–Sortuvalnyi – Sumy section

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми		Суми – Харків–Сортувальний	
	Навантажений поїзд	Порожній поїзд	Навантажений поїзд	Порожній поїзд
Тривалість руху, с	13 202	12 268	13 104	12 289
Витрата пального, кг	1 387	751	1 309	717

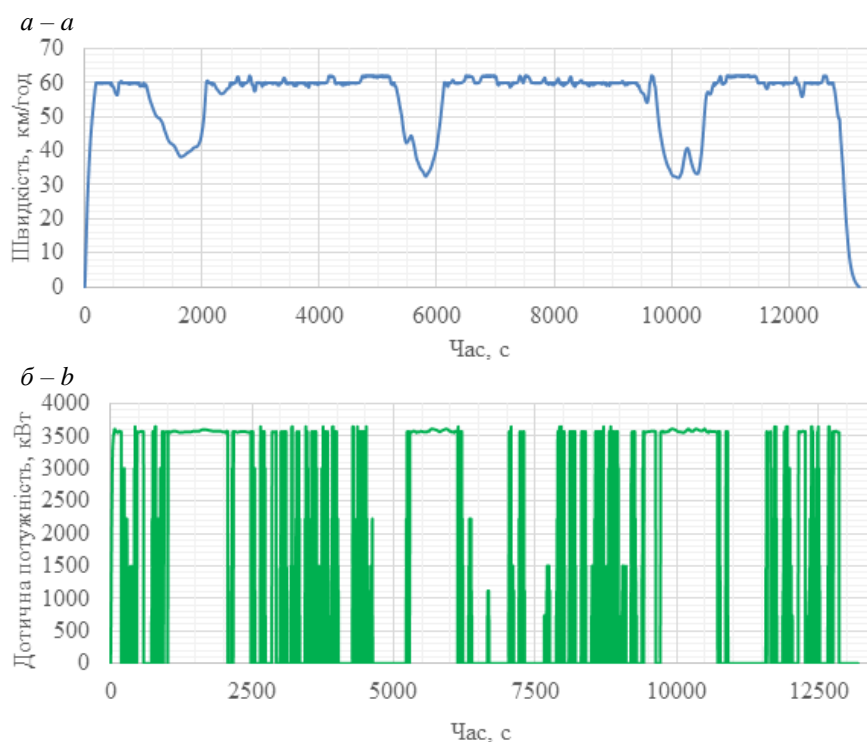


Рис. 9. Часова залежність швидкості ( $a$ ) та дотичної потужності тепловоза ( $b$ ) під час руху поїзда з навантаженими вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми за роздільного навантаження секцій тепловоза

Fig. 9. Time dependence of speed ( $a$ ) and tangential power of a diesel locomotive ( $b$ ) during the movement of a train with loaded cars from Kharkiv–Sorting to Sumy station with separate loading of diesel locomotive sections

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

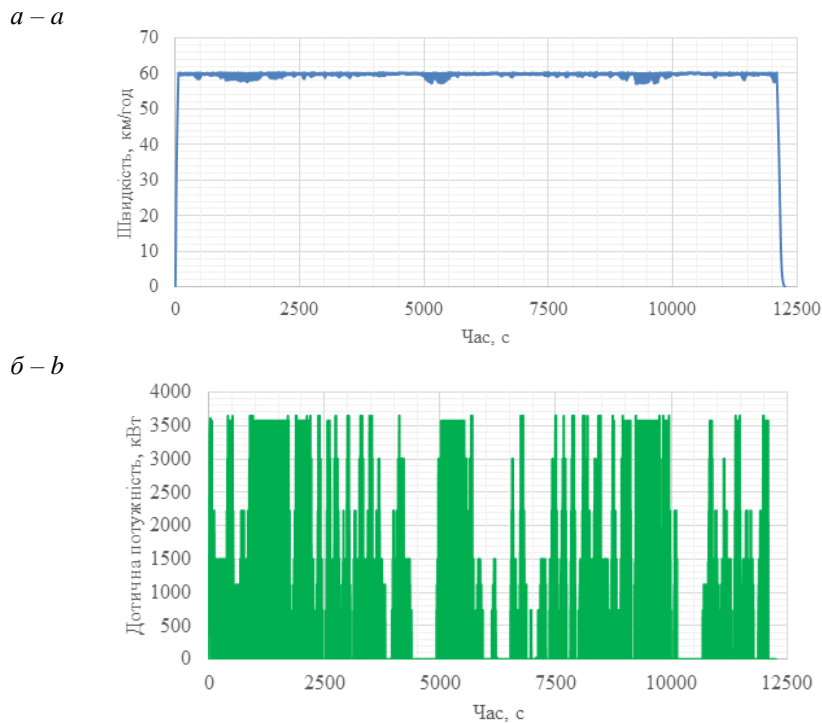


Рис. 10. Часова залежність швидкості (а) та дотичної потужності тепловоза (б) під час руху поїзда з порожніми вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми за роздільного навантаження секцій тепловоза

Fig. 10. Time dependence of speed (a) and tangential power of a diesel locomotive (b) during the movement of a train with empty wagons from Kharkiv–Sorting to Sumy station with separate loading of diesel locomotive sections

Аналіз даних табл. 6 і 7 показує, що порівняно із серійним тепловозом під час руху з роздільним навантаженням секцій споживання пального знижується на 18,7...19,6 % з навантаженими вагонами та на 8,1...10,3 % з порожніми вагонами. У випадку тяги однією секцією під час руху з порожніми вагонами зменшення споживання пального складає 29,5...31,0 % порівняні з рухом із серійним тепловозом. Тривалість руху практично не змінюється.

Таким чином, застосування роздільного на-

вантаження секцій забезпечило зменшення споживання пального тепловозом. Величина економії залежить від способу навантаження, для визначення якого необхідно враховувати параметри поїзда та допустимі режими руху. Для цього необхідна розробка енергооптимальних режимів руху. Додаткове зниження споживання пального вбачається в разі застосування акумулювання в бортових накопичувачах енергії в режимах електродинамічного гальмування та її використання в режимах тяги.

Таблиця 5

**Результати розрахунку параметрів руху на ділянці Харків–Сортувальний – Суми для поїзда з порожніми вагонами у випадку тяги однією секцією тепловоза**

Table 5

**Results of calculation of traffic parameters on the Kharkiv–Sorting section – Sumy for a train with empty cars in case of traction by one section of a diesel locomotive**

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми	Суми – Харків–Сортувальний
Тривалість руху, с	12 315	12 381
Витрата пального, кг	577	550

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

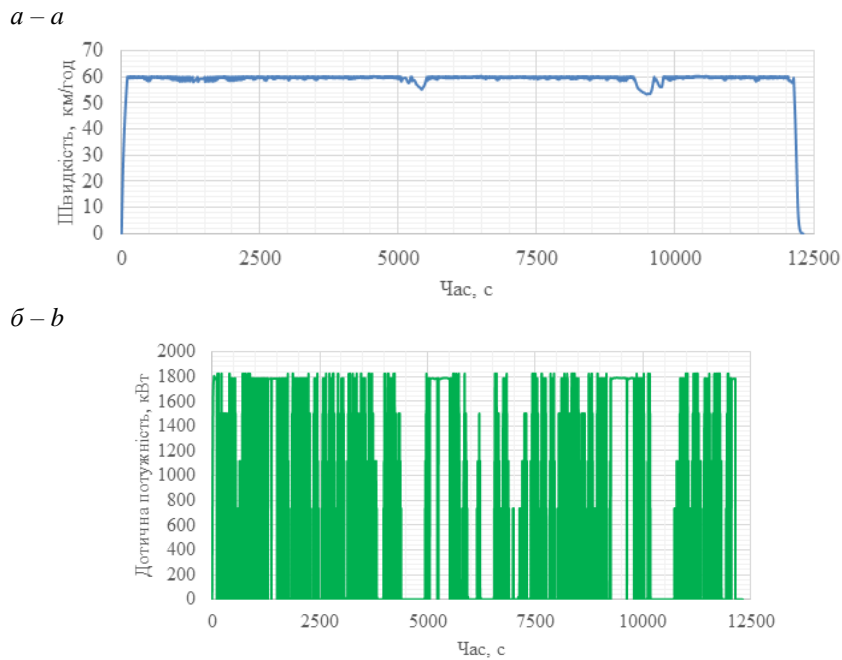


Рис. 11. Часова залежність швидкості (*a*) та дотичної потужності тепловоза (*b*) під час руху поїзда з порожніми вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми у випадку тяги однією секцією тепловоза

Fig. 11. Time dependence of speed (*a*) and tangential power of a diesel locomotive (*b*) during the movement of a train with empty wagons from Kharkiv-Sorting to Sumy station with one section of the locomotive pulling

Таблиця 6

## Роздільне навантаження секцій

Table 6

## Separate load of sections

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми		Суми – Харків–Сортувальний	
	Навантажений поїзд	Порожній поїзд	Навантажений поїзд	Порожній поїзд
Зміна тривалості руху, %	0,5	1,7	0,01	1,28
Зменшення витрати пального, %	19,6	10,3	18,7	8,1

Таблиця 7

## Рух однією секцією з порожнім поїздом

Table 7

## Movement in one section with an empty train

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми	Суми – Харків–Сортувальний
Зміна тривалості руху, %	1,3	0,01
Зменшення витрати пального, %	31,0	29,5

## Висновки

## Наукова новизна та практична значимість

Авторами вирішено серію тягових задач для ділянки колії між станціями Харків–Сортувальний та Суми під час руху поїздів із вантажним тепловозом 2ТЕ116, на якому застосовано роздільне навантаження дизель-генераторів секцій тепловоза. Запропоновано спосіб формування тягових характеристик тепловоза під час роздільного навантаження дизель-генераторів. Практична значимість полягає в розроблених математичних моделях руху поїзду, зокрема для випадку роздільного навантаження дизель-генераторів секцій тепловоза. Отримані результати можуть бути впроваджені під час модернізації тепловозів чи створенні дизельного рухомого складу із застосуванням багатодизельної силової енергетичної установки.

Визначено вплив роздільного навантаження секцій двосекційного магістрального вантажного тепловоза 2ТЕ116 на витрату пального. Дослідження проведено на ділянці Харків–Сортувальний – Суми для випадку руху поїздів із навантаженими і порожніми вагонами.

Застосування роздільного навантаження секцій під час руху поїзда з навантаженими вагонами зумовило зниження споживання пального на 18,7...19,6 % порівняно зі споживанням пального серійним тепловозом, у якого обидві секції навантажені ідентично.

Під час руху поїзда з порожніми вагонами зменшення споживання пального залежить від того, однією чи двома секціями здійснюється тяга. У першому випадку зниження споживання пального складає 29,5...31,0 %, у другому – 8,1...10,3 %.

Для досягнення найбільшої ефективності від застосування роздільного навантаження секцій необхідно враховувати параметри поїзда та розробляти енергоощадні режими його руху.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобирь Д. В., Боднар Є. Б., Кислий Д. М., Десяк А. Є. Визначення параметрів обмеження поздовжнього прискорення для оптимізації витрат енергоресурсів на тягу поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 4 (104). С. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298573>
2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги* : підручник. Дніпро, 2022. 385 с.
3. Боднар Б. Є., Нечаєв С. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування*. Дніпропетровськ : Ліра, 2010. 358 с.
4. Кислий Д. М., Десяк А. Є., Бобирь Д. В., Боднар Є. Б. Визначення енергооптимізованого керування локомотивом під час розгону поїзда. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 4 (104). С. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298713>
5. *Концепція (прогнозна) роботи з парком локомотивів АТ «Укрзалізниця» до 2033 року*. URL: <https://www.railway.supply/wp-content/uploads/2021/08/konceptczya-2033.-yak-ukrzalizniczya-planu%D1%94-zabezpechuvati-sebe-lokomotivami.pdf>
6. Ломотько Д. В., Красноштан О. М., Кава О. С. Шляхи розвитку логістики міжнародних пасажирських залізничних перевезень: інфраструктурний, операційний та інноваційний аспекти. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 1. С. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i1.276337>
7. Маслів В. Г. *Сучасні конструкції та динаміка рухомого складу залізниць*. Харків : НТУ «ХП», 2014. 120 с.
8. Пригула О. А., Пасечник М. Г. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). С. 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
9. *ІТТЗ/Модернізація тягового рухомого складу*. URL: <https://trz.com.ua/modernization-ua/>
10. Слащов В. А. *Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті*. Луганськ, 2005. 231 с.
11. *ALP-45DP electro-diesel locomotive debut*. URL: <https://www.railwaygazette.com/alp-45dp-electro-diesel-locomotive-debut/35323.article>

12. *Bombardier TRAXX DE ME – Four is better than one*. URL: <https://www.railengineer.co.uk/bombardier-traxx-de-me-four-is-better-than-one/>
13. Bondarenko I., Severino A., Olayode I. O., Campisi, T., Neduzha L. Dynamic Sustainable Processes Simulation to Study Transport Object Efficiency. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7. Iss. 9. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090124>
14. *ES44ACi Locomotive*. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/heavy-haul-locomotives/es44aci-locomotive>
15. Nakagawa T., Morita E., Nishizawa H., Numazaki M. *Improvement of diesel electric locomotive traction system*. URL: <http://www.sze.hu/~szenasy/VILLVONT/vill%20C3%A9s%20DV%20vont/445Jap%C3%A11nfej.pdf>
16. Riabov Ie., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 101416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>
17. Riabov, I., Goolak, S., Neduzha, L. (2024) An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*. Vol. 6. P. 611–631. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028>
18. Smyrnov I., Lyubitseva, O., Zapototskyi, S., Hryniuk, D., Stepanets, I. European Transport Corridors: Experience and Opportunities for Ukraine in Times of Danger. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE* 2023. 2023. Vol. 807. P. 400–411. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_35)
19. *Stadler – Locomotive bi-mode Euro Dual*. URL: [http://mediarail.be/Materiel\\_roulant/Bi-mode/Stadler%20Euro%20Dual/Euro%20Dual\\_01.htm](http://mediarail.be/Materiel_roulant/Bi-mode/Stadler%20Euro%20Dual/Euro%20Dual_01.htm)

Ye. S. RIABOV<sup>1\*</sup>, B. Kh. YERITSIAN<sup>2</sup>, I. M. KOLODI<sup>3</sup>, S. V. IVANOV<sup>4</sup>, O. A. SYCH<sup>5</sup>,  
A. V. HALYCH<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 302 14 54, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

<sup>2</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

<sup>3</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail ivan.kolodii@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0001-9583-2787

<sup>4</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail stanislav.v.ivanov@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0004-0190-1609

<sup>5</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail oleh.sych@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-2720-2460

<sup>6</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail anastasiia.halych@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0006-7912-2802

## Increasing the Fuel Efficiency of a Mainline Diesel Locomotive with Separate Section Loading

**Purpose.** The paper aims to investigate the increase of fuel efficiency of a mainline freight locomotive in the case of separate loading of diesel generators of its individual sections. **Methodology.** The study was carried out for the non-electrified section between Kharkiv-Sorting and Sumy stations during the movement of a freight train with 45 loaded and empty freight cars in both directions. The movement of a train with a freight mainline two-section diesel locomotive 2TE116 was taken. To determine the parameters of the movement, a mathematical model was developed, which was used to solve a series of traction problems. The traction problems are calculated for the cases of train movement with a series diesel locomotive and a diesel locomotive with separate loading of diesel generators of its individual sections. A method of loading sections is proposed for modeling and the traction characteristics of the locomotive are constructed in accordance with this method. **Findings.** It has been established that the use of separate

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

loading of diesel generators of individual sections of a diesel locomotive when running a train with loaded cars reduces fuel consumption by 18.7...19.6 % compared to running a serial diesel locomotive. For the case of a train with empty cars, the reduction in fuel consumption is 8.1...10.3 % compared to a train with a serial diesel locomotive. It has been found that the movement of a train with empty cars can be carried out with traction by one section of a diesel locomotive. In this case, the reduction in fuel consumption is 29.5...31.0 %. In all the studied cases, the duration of the movement is practically the same. **Originality.** The authors of this paper have solved traction problems for a real track section when a train with a freight diesel locomotive is moving, where separate loading of diesel generators of its sections is used. A method for forming the traction characteristics of a locomotive with separate loading of diesel generators is proposed. **Practical value.** The developed mathematical models of train movement, including for the case of separate loading of diesel generators of diesel locomotive sections, can be used in the modernization of diesel locomotives or the creation of diesel rolling stock using a multi-diesel power plant.

*Keywords:* rolling stock; locomotive; fuel efficiency; energy saving

## REFERENCES

1. Bobyr, D. V., Bodnar, E. B., Kisliy, D. M., & Desiak, A. Y. (2023). Determination of Parameters for Limiting Longitudinal Acceleration to Optimize Energy Consumption for Train Traction. *Science and Transport Progress*, 4(104), 13-24. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298573> (in Ukrainian)
2. Bobyr, D. V., Ghryshhenko, M. A., & Serdjuk, V. N. (2022). *Teoriia lokomotyvnoi tiahv*: pidruchnyk. Dnipro. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. Je., Njehajev, Je. Gh., & Bobyrj, D. V. (2010). *Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Osnovy proektuvannia*. Dnipropetrovsk: Lira. (in Ukrainian)
4. Kisliy, D. M., Desiak, A. Y., Bobyr, D. V., & Bodnar, E. B. (2023). Determination of Energy-Optimized Locomotive Control During Train Acceleration. *Science and Transport Progress*, 4(104), 25-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298713> (in Ukrainian)
5. *Kontsepsiia (prohnozna) roboty z parkom lokomotyviv AT «Ukrzaliznytsia» do 2033 roku*. Retrieved from <https://www.railway.supply/wp-content/uploads/2021/08/konczepczyia-2033.-yak-ukrzalizniczya-planu%D1%94-zabezpechuvati-sebe-lokomotivami.pdf> (in Ukrainian)
6. Lomotko, D. V., Krasnoshtan, O. M., & Kava, O. S. (2023). Ways and mechanisms of suburban passenger rail logistics development on non-electrified railway lines. *Information and control systems at railway transport*, 28(1), 11-18. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276337> (in Ukrainian)
7. Masliyev, V. Gh. (2014). *Suchasni konstruktsii ta dynamika rukhomoho skladu zaliznyts*. Kharkiv: NTU «KhPI». (in Ukrainian)
8. Prytula, M. G., & Pasechnyk, O. A. (2019). Development of the algorithms formation of energy- optimized trains traffic modes. *Science and Transport Progress*, 6(78), 82-100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641> (in Ukrainian)
9. *PTRZ/Modernizatsiia tiahovoho rukhomoho skladu*. Retrieved from <https://trz.com.ua/modernization-ua> (in Ukrainian)
10. Slashhov, V. A. (2005). *Tiahovi ta halmovi rozrakhunky na reikovomu transporti*. Luhansk. (in Ukrainian)
11. *ALP-45DP electro-diesel locomotive debut*. Retrieved from <https://www.railwaygazette.com/alp-45dp-electro-diesel-locomotive-debut/35323.article> (in English)
12. *Bombardier TRAXX DE ME – Four is better than one*. Retrieved from <https://www.railengineer.co.uk/bombardier-traxx-de-me-four-is-better-than-one/> (in English)
13. Bondarenko, I., Severino, A., Olayode, I. O., Campisi, T., & Neduzha, L. (2022). Dynamic Sustainable Processes Simulation to Study Transport Object Efficiency. *Infrastructures*, 7(9), 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090124> (in English)
14. *ES44ACi Locomotive*. Retrieved from <https://www.wabteccorp.com/locomotive/heavy-haul-locomotives/es44aci-locomotive>
15. Nakagawa, T., Morita, E., Nishizawa, H., & Numazaki, M. *Improvement of diesel electric locomotive traction system*. Retrieved from <http://www.sze.hu/~szenasy/VILLVONT/vill%20%C3%A9s%20DV%20vont/445Jap%C3%A1nfejl.pdf> (in English)
16. Riabov, I., Goolak, S., Kondratieva, L., & Overianova, L. (2023). Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 42, 101416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

---

17. Riabov, I., Goolak, S., & Neduzha, L. (2024). An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*, 6(2), 611-631. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028> (in English)
18. Smyrnov, I., Lyubitseva, O., Zapototskyi, S., Hryniuk, D., & Stepanets, I. (2023). European Transport Corridors: Experience and Opportunities for Ukraine in Times of Danger. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2023*, 807, 400-411. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_35) (in English)
19. *Stadler – Locomotive bi-mode Euro Dual*. Retrieved from [http://mediarail.be/Materiel\\_roulant/Bi-mode/Stadler%20Euro%20Dual/Euro%20Dual\\_01.htm](http://mediarail.be/Materiel_roulant/Bi-mode/Stadler%20Euro%20Dual/Euro%20Dual_01.htm) (in English)

Надійшла до редколегії: 29.01.2024

Прийнята до друку: 03.06.2024

# ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 629.464.46:624.014.2

Л. І. КЛОЧКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Фак. «Будівництво, архітектура та інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 558 44 16, ел. пошта leoniddzmk@gmail.com, ORCID 0009-0009-3478-6076

## Несні сталеві конструкції для встановлення залізничних тензометричних ваг

**Мета.** Основною метою публікації є зіставлення за основними техніко-економічними показниками двох запропонованих конструктивних варіантів опорної системи для залізничних тензометричних ваг під чотири-вісні вагони широкої колії. Це обумовлено необхідністю проведення реконструкції і модернізації основних фондів промислового підприємства, зокрема капітальної перебудови та заміни старих залізничних ваг на сучасні електронні тензометричні ваги. Також мета роботи пов'язана з необхідністю розширення номенклатури залізничних вагонів, для яких передбачена можливість зважування, включаючи й транспортні одиниці закордонного вагонного парку. **Методика.** Для досягнення зазначеної мети проаналізовано сучасні види залізничних вагонів для вантажних перевезень, визначено основні складові тензометричних ваг для зважування основних видів вагонів та розроблено спеціальну опорну систему для підтримання платформи ваг. Опорна система передбачена у двох конструктивних варіантах – з однією просторовою несною рамою та з двох окремих плоских несних рам. За допомогою вітчизняного проектно-обчислювального комплексу SCAD побудовано скінченноелементні моделі для обох запропонованих конструктивних варіантів. На основі аналізу їх напружено-деформованого стану підібрано раціональні перерізи для кожного конструктивного елемента, а також визначено загальну масу. **Результати.** Проведений порівняльний аналіз двох розроблених конструктивних рішень для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги дозволив установити, що варіант із двох окремих несних рам має меншу масу приблизно на 40 % відносно варіанта з однією просторовою несною рамою. Проте технологічність його виготовлення є дещо нижчою, оскільки при цьому задіяно 10 конструктивних елементів проти 7 варіанта № 1. **Наукова новизна.** Проведений чисельний аналіз дозволив теоретично обґрунтувати більш раціональне та ефективне конструктивне рішення для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги. **Практична значимість.** Розроблено та запропоновано для практичної реалізації конструктивний варіант сталеві опорної системи, який за своїми техніко-економічними показниками є найефективнішим для наявних умов діючого промислового підприємства. Також розроблений конструктивний варіант узгоджено з проектом капітальної реконструкції будівлі для зважування залізничних вагонів.

*Ключові слова:* вантажний вагон; сталева опорна система; залізничні тензометричні ваги; метод скінченних елементів; проектно-обчислювальний комплекс SCAD

### Вступ

Сучасний залізничний транспорт становить доволі потужну систему, яка за обсягами перевезень і рівнем застосування технічних засобів є однією з провідних галузей багатьох країн світу. Зокрема, українська залізниця за своїми розмірами та пропускну здатністю поси-

дає дванадцяте місце серед залізниць цивілізованих країн світу (табл. 1).

Оскільки залізничні перевезення є надзвичайно різноманітними, то й вагонний парк є також доволі різнотипним як за призначенням, так і за вантажопідйомністю (рис. 1). Для перевезення різних типів вантажів використовують низку типорозмірів вагонів – платформи, криті вагони, піввагони, цистерни, хопери, ре-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

фрижератори, автовози, лісовози, бітумовози, вагони для тварин і перевезення невологостійких вантажів тощо (рис. 1). Відповідно, такий широкий спектр вагонного парку вимагає потужних можливостей щодо точного контролю ваги вантажів, які перевозять.

Для зважування вагонів використовують спеціальні пристрої – залізничні ваги. Вони бувають різноманітні, їх класифікують за такими ознаками: за принципом дії, за призначенням, за типом зважування, за типом конструктивного рішення, за типом електронного обладнання (для електронних вагів), за типом зважуваного вагона, за типом колії тощо. Основну класифікаційну схему наведено на рис. 2.

Найбільш поширеним типом є статичні електронні тензометричні ваги, які розташовують на підприємствах приймання та відправлення вантажів (на рис. 2 їх виділено жовтим кольором). Конструктивно такі ваги влаштовують у спеціальних фундаментних приміщеннях, вони не потребують додаткових обслуговувальних будівель. Зазвичай їх накривають відносно легкою конструкцією піддашка, яка виконує функцію захисту від небезпечних природно-кліматичних умов і створює прийнятні умови для роботи обслуговчого персоналу.

Загальне технічне рішення таких ваг для чотиривісних вагонів широкої колії, характерної для вітчизняної залізниці, представлено на рис. 3.

*a – a**г – д**б – б**д – е**в – в**е – ф*

Рис. 1. Основні типи вантажних вагонів української залізниці:  
*a* – платформа; *б* – критий вагон; *в* – піввагон; *г* – цистерна; *д* – хопер; *е* – рефрижератор

Fig. 1. The main types of freight cars of the Ukrainian railway:

*a* – platform; *b* – covered wagon; *c* – semi-wagon; *d* – tank; *e* – hopper; *f* – refrigerator

Таблиця 1

## Довжина залізничної мережі країн світу

Table 1

## Length of the railway network in the world

№ з/п	Країна	Довжина залізниць, км
	Весь світ	1 122 650
1	США	194 731
2	Китай	71 600
3	Індія	63 518
4	Канада	49 422
5	Німеччина	45 514
6	Австралія	41 588
7	Аргентина	34 463
8	Франція	32 682
9	Бразилія	31 543
10	Польща	23 420
11	Японія	23 168
12	Україна	22 473
13	ПАР	22 298
14	Мексика	19 510
15	Італія	19 493
16	Англія	16 893
17	Іспанія	14 189
18	Казахстан	13 601

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

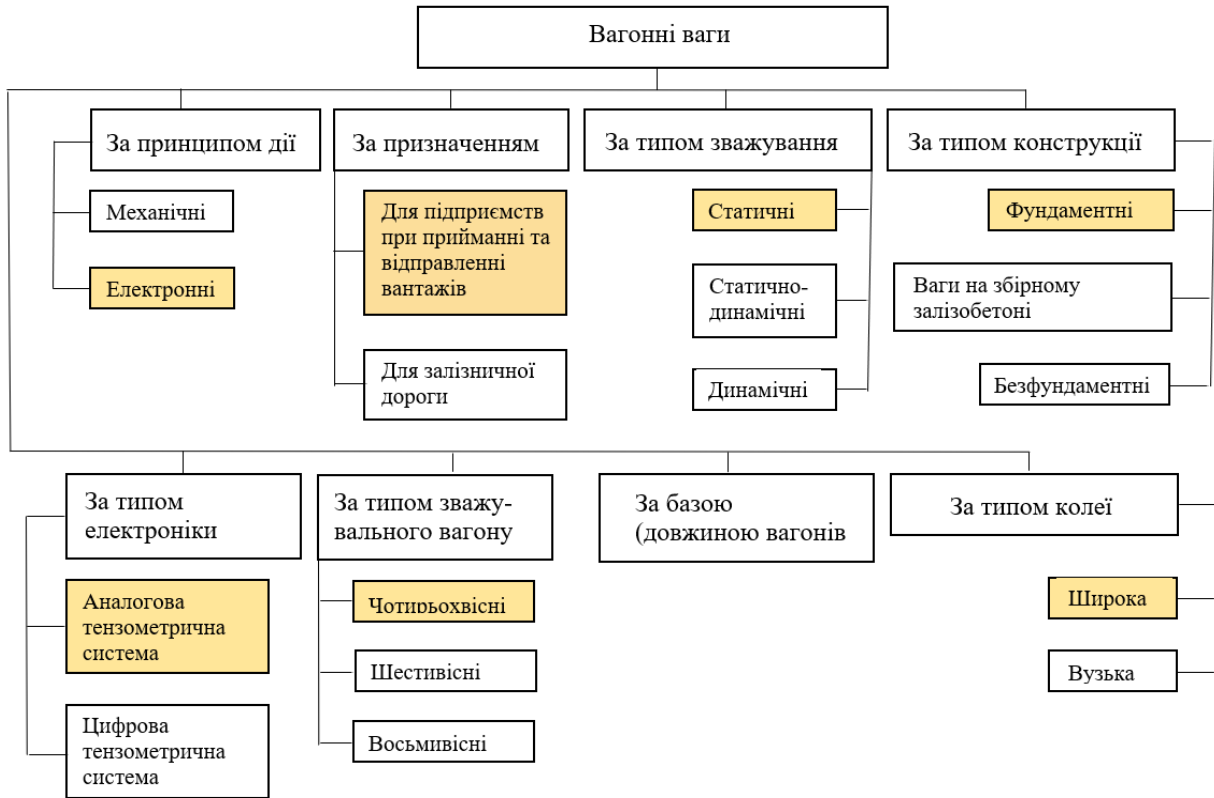


Рис. 2. Класифікація залізничних вагонних ваг

Fig. 2. Classification of railway wagon scales

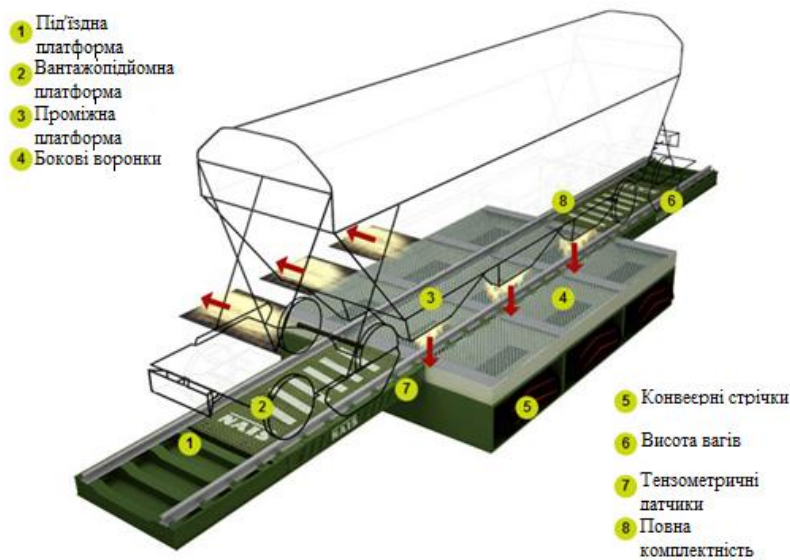


Рис. 3. Загальне технічне рішення залізничних вагонних ваг

Fig. 3. General technical solution for railroad wagon scales

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Відповідно до [12], для сучасних темпів розвитку промисловості характерна доволі швидка зміна видів продукції, випуск якої залежить від виробничих потужностей. Це вимагає зміни обладнання, яка в машинобудівній галузі відбувається з періодичністю раз на 15 років, у будівельній – раз на 8 років, а в електронній – раз на 5 років. При цьому фізична довговічність промислових будівель перебуває в межах 100 років [3]. Таким чином, за життєвий цикл будівлі подібна зміна технологій відбувається в середньому до 10 разів. Тому постає необхідність проведення ефективної реконструкції таких будівель і промислових підприємств у цілому, пристосування їх до новітніх викликів ринку та нових виробничих потужностей.

Саме така ситуація все частіше виникає на підприємствах залізничної галузі України і спонукає власників цих підприємств переходити на нові, більш сучасні проектно-конструкторські рішення щодо капітальних фондів. Для підприємств, пов'язаних із залізничними перевезеннями, при цьому нерідко виникає необхідність переоснащення або додаткового встановлення ваг для зважування вантажних вагонів. Саме така ситуація – потреба модернізації застарілої конструкції під залізничні ваги – постала на одному з підприємств Дніпропетровської області.

### Мета

Основною метою цього дослідження є розробка ефективної опорної конструкції для встановлення сучасних залізничних тензометричних ваг.

### Методика

Для розташування сучасних залізничних тензометричних ваг необхідно було виконати реконструкцію наявної виробничої одноповерхової будівлі (рис. 4). Будівля слугувала для розміщення застарілих механічних залізничних ваг, до того ж ще й доволі зношених під час тривалої експлуатації.

З архітектурної точки зору будівля мала прямокутну в плані форму з розмірами  $18,0 \times 16,8$  м та висотою 7,4 м до верху покрівлі. Фундаменти стрічкові під зовнішні стіни із глибиною закладання 4,3 м.

Із конструктивної точки зору будівля виконана за каркасною системою зі збірних конструкцій. На залізобетонні консольні колони укладені горизонтальні ригельні балки, які є несними елементами конструкції покриття.

Підвальна частина будівлі має спеціальне заглиблення з розмірами в плані  $7,3 \times 16,8$  м за максимальної глибини 6,56 м. Внутрішній простір заглиблення поділений на окремі блоки спеціальними залізобетонними вертикальними стінками. По зовнішньому периметру підвальна частина відгороджена від навколишнього ґрунту залізобетонними стіновими конструкціями товщиною 400 мм. Із такої ж конструкції влаштована й нижня частина підвального приміщення, яка утворює замкнену просторову коробчасту систему.

Під час модернізації передбачено, що ця коробчаста підвальна частина будівлі в конструктивному плані буде залишена без змін, проте будуть виконані деякі ремонтні роботи з її оновлення. Щодо верхньої залізобетонної каркасної конструкції будівлі було прийнято рішення її повного демонтажу й заміни на легку навісну конструкцію зі сталевих каркасу. Сам каркас спроектовано окремо відповідно до чинних стандартів [4, 5].

Задача заміни старих ваг на сучасні тензометричні потребувала розробки спеціальної опорної конструкції. Вона була необхідна для підтримання платформи залізничних ваг. Було розглянуто 2 варіанти конструкції опорної системи:

- варіант № 1 – з однією просторовою несною рамою;
- варіант № 2 – з двох окремих незв'язаних несних рам.

Обидва конструктивні варіанти виконано зі сталевих прокатних профілів відповідно до чинних в Україні стандартів на металопрокат [6–11].

Для аналізу роботи конструктивних варіантів узято метод скінченних елементів [13, 15, 16, 19, 20]. При цьому застосовано вітчизняний проектно-обчислювальний комплекс SCAD [17]. Під час скінченноелементного моделювання використано авторські розробки і напрацювання, представлені в роботах [1, 2, 14, 18].

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

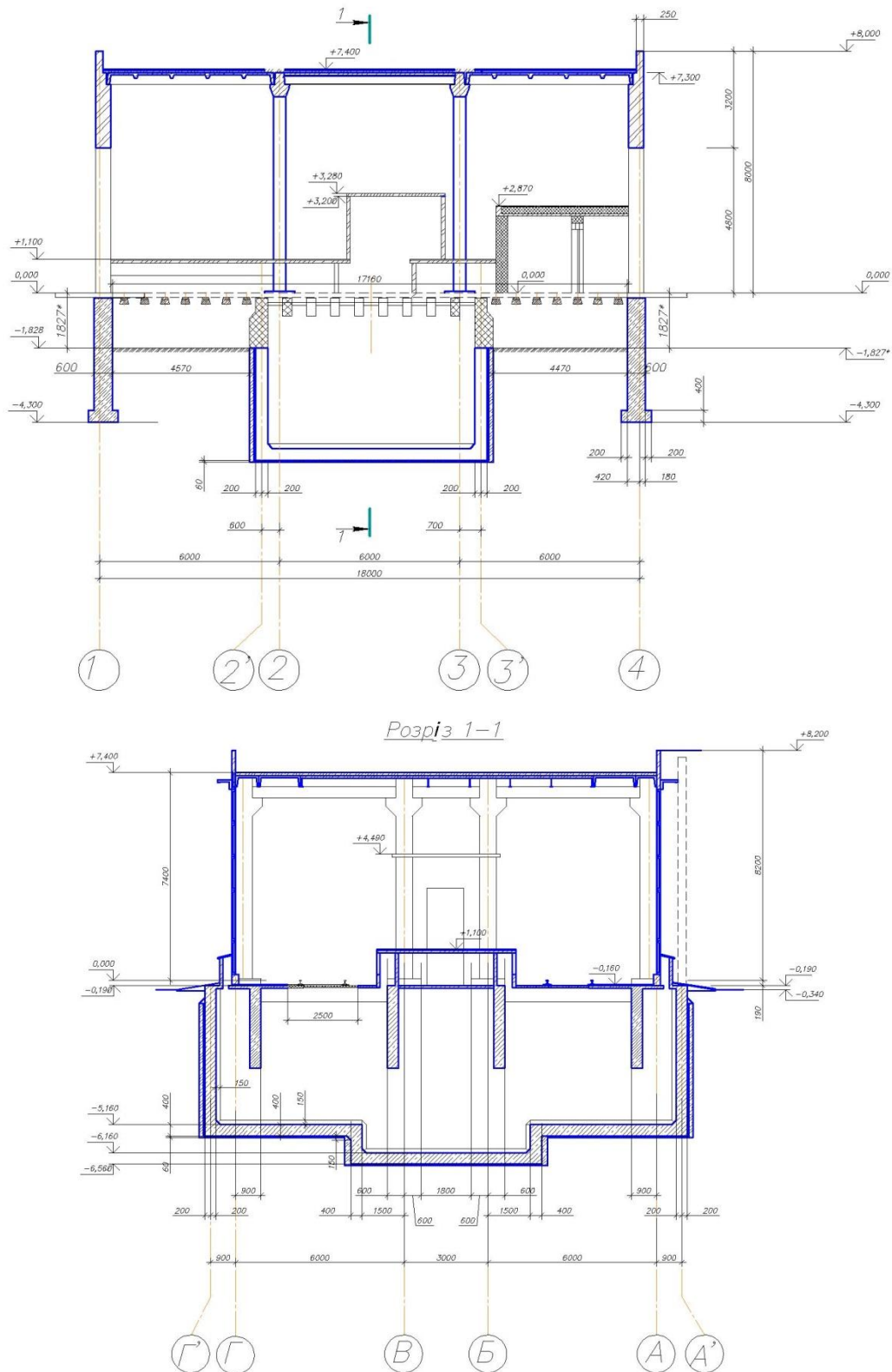


Рис. 4. Конструктивне рішення будівлі для реконструкції під залізничні ваги

Fig. 4. Structural solution of the building for reconstruction for railway scales

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

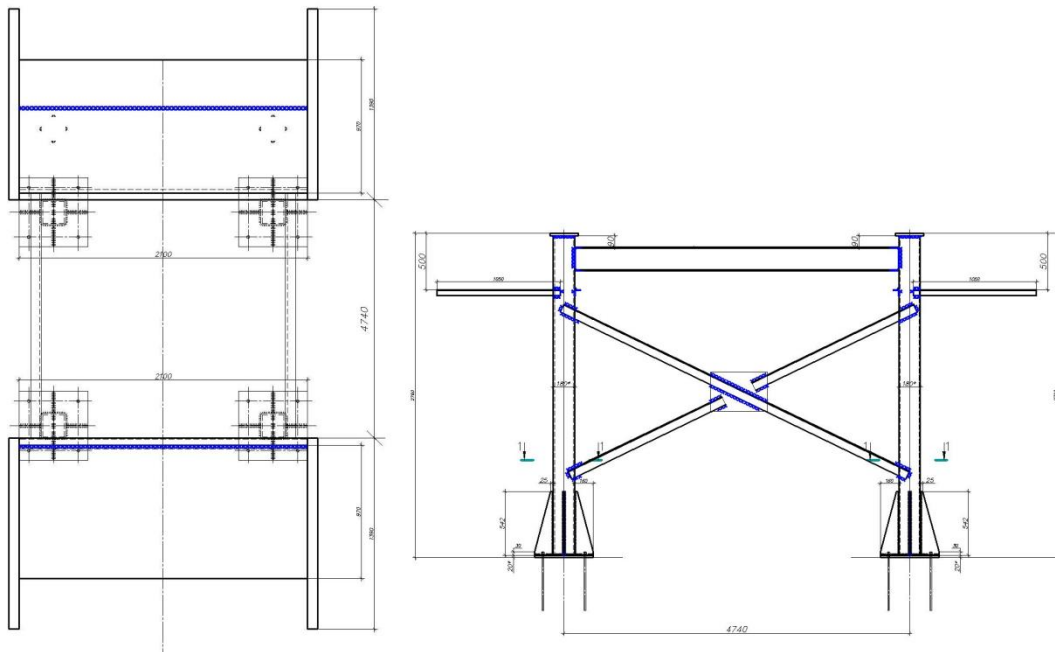
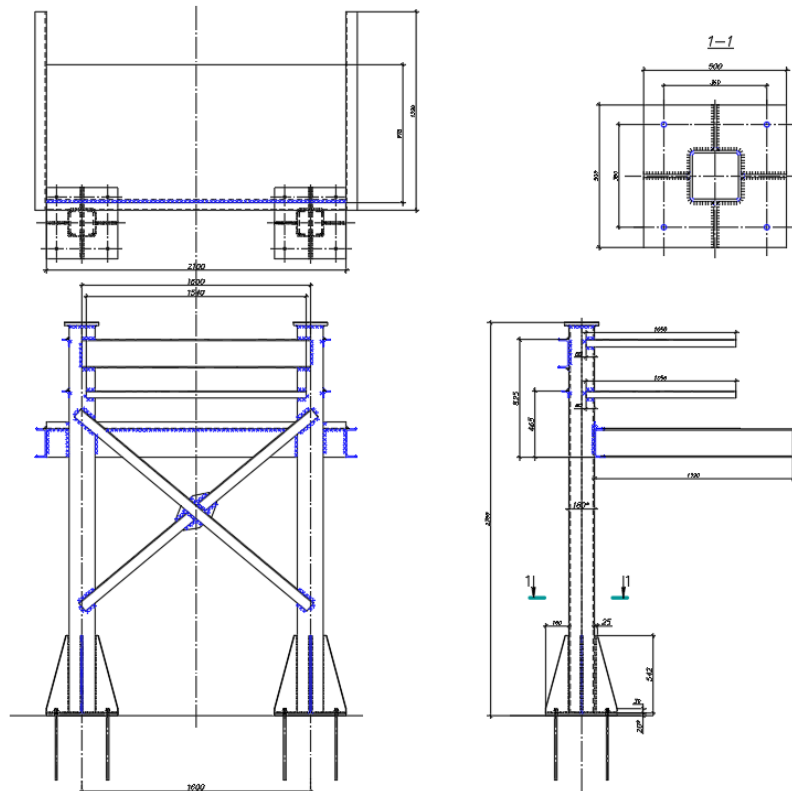
*a – a**б – б*

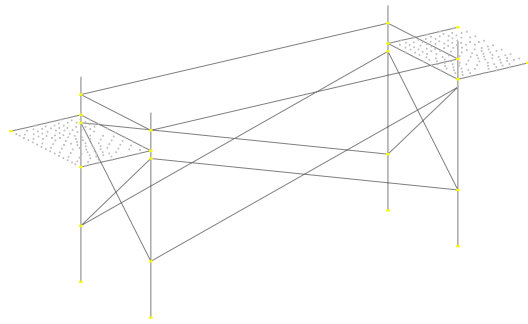
Рис. 5. Конструктивне рішення опорної системи під залізничні ваги:  
*a* – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 5. Constructive solution of the support system for railway scales:  
*a* – variant No. 1; *b* – variant No. 2

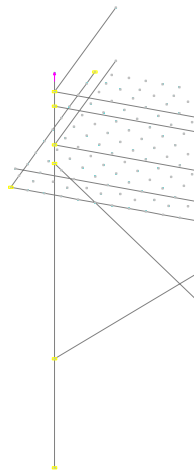
### Результати

Побудовані скінченноелементні моделі в проектно-обчислювальному комплексі SCAD для обох розглядуваних конструктивних варіантів опорної системи під залізничні ваги наведено на рис. 6. Моделі являють собою пластинчасто-стрижневі системи, у яких для підвищення достовірності отриманих результатів використано спеціальні скінченні елементи з односторонніми зв'язками. Це дозволило більш коректно відобразити передачу зовнішніх навантажень від власної ваги платформи

*a – a*



*б – б*



залізничних ваг і власної ваги вагона для зважування.

На рис. 6 також представлено отримані зображення деформацій від заданого навантаження, а в табл. 1 і 2 наведено результати підбору поперечних перерізів для обох конструктивних варіантів разом із розрахованими показниками маси. Оскільки роботи було виконано у 2020–2021 рр., то розраховані тоді цінові показники сьогодні не є актуальними, а тому в цій публікації з етичних і економічних міркувань їх не наведено.

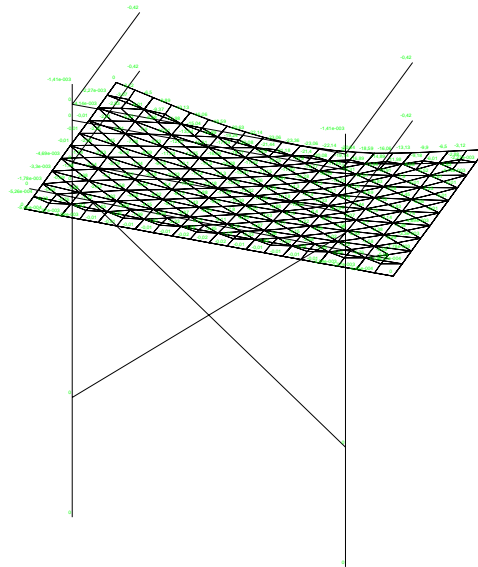
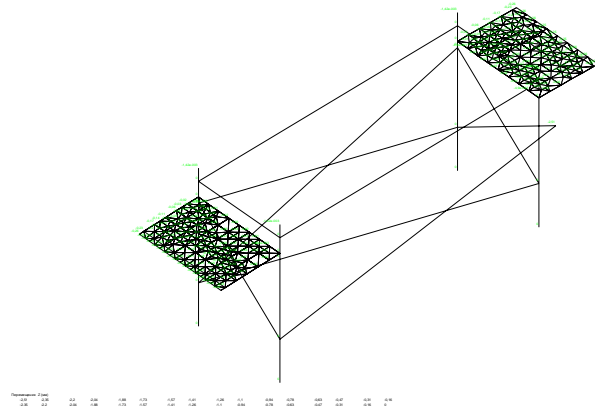


Рис. 6. Модель і деформована схема опорної системи під залізничні ваги:  
*a* – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 6. Model and deformed diagram of the support system for railway scales:  
*a* – variant No. 1; *b* – variant No. 2

Таблиця 1

## Підібрані поперечні перерізи для конструктивного варіанта № 1

Table 1

## Selected cross-sections for design option No. 1

Елемент	Кількість, шт.	Переріз	Вага кг/м.п.(м <sup>2</sup> )	Загальна маса конструкції, т
Стояк	4	□ 180 × 12	61,36	2,1
Вертикальна в'язь (поперечний напрям)	2	└ 60 × 4	2,70	
Вертикальна в'язь (поздовжній напрям)	2	└ 140 × 9	19,41	
Конструкція під настил	2	└ 60 × 4	2,70	
Настил	2	t 6	47,10	
Розпірка (поперечний напрям)	2	[ 5	4,84	
Розпірка (поздовжній напрям)	2	[ 14	12,30	

Таблиця 2

## Підібрані поперечні перерізи для конструктивного варіанта № 2

Table 2

## Selected cross-sections for design option No. 2

Елемент	Кількість, шт.	Переріз	Вага кг/м.п.(м <sup>2</sup> )	Загальна маса конструкції, т
Стояк	4	□ 180 × 12	61,36	1,3
Вертикальна в'язь	2	└ 60 × 4	3,68	
Конструкція під настил	2	└ 60 × 4	3,68	
Настил	2	t 6	47,10	
Розпірка (рівень 1)	2	[ 5	4,84	
Консольна частина (рівень 1)	4	[ 5	4,84	
Розпірка (рівень 2)	2	└ 40 × 3	1,85	
Розпірка (рівень 3)	2	└ 25 × 3	1,12	
Розпірка (рівень 4)	2	└ 25 × 3	1,12	
Консольна частина (рівень 4)	4	└ 25 × 3	1,12	

У цілому напружено-деформований стан для обох розглянутих конструктивних варіантів опорної системи доволі близький. Відмінності полягають у способі взаємодії вертикальних несних елементів із горизонтальними несними елементами.

Значення отриманих максимальних вертикальних деформацій для конструктивного варіанта № 1 становить 2,51 мм, а для конструктивного варіанта № 2 – 2,36 мм.

Як видно з табл. 1, загалом конструктивний варіант № 1 містить меншу кількість елементів ніж варіант № 2, тобто технологічність його

виготовлення в практичних умовах є вищою. Проте загальна маса варіанта № 1 є майже вдвічі вищою ніж варіанта № 2. Через це як остаточне рішення слід рекомендувати варіант № 2 для його практичної реалізації.

### Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, у цій публікації проведено теоретичне зіставлення двох розроблених конструктивних варіантів для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги. При цьому з наукової точки зору обґрунтовано конструктивні та масові показники кожного з варіантів за допомогою сучасного чисельного методу скінченних елементів.

Остаточний обраний конструктивний варіант доопрацьовано під конкретні місцеві умови виробничого підприємства. Це дозволяє його практичну реалізацію навіть за умов діючого виробництва.

### Висновки

Проведений порівняльний аналіз двох розроблених конструктивних рішень для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги дозволив установити, що варіант із двох окремих незв'язаних несних рам має меншу масу приблизно на 40 % відносно варіанта з однією просторовою несною рамою. Проте технологічність його виготовлення є дещо нижчою, оскільки при цьому задіяно 10 конструктивних елементів проти 7 конструктивних елементів варіанта № 1.

Остаточний обраний конструктивний варіант можна рекомендувати до практичної реалізації в умовах діючого промислового підприємства.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банніков Д. О. Використання будівельно-орієнтованого ПК SCAD для аналізу роботи машинобудівних конструкцій. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. Вип. 1 (73). С. 98–111. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123406>
2. Безсалий В. М., Банніков Д. О. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>
3. 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. 70 с.
4. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. *Зі зміною № 1* [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд, 2018. 36 с.
5. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. *Норми проектування. Зі зміною № 1* [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 220 с.
6. ДСТУ 2251:2018 Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні. *Сортамент* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 10 с.
7. ДСТУ 3436-96 Швелери сталеві гарячекатані. *Сортамент* [Чинний від 1999-01-01]. Київ : Держстандарт України, 2004. 11 с.
8. ДСТУ 4747:2007 (EN 10058:2003, NEQ) Прокат сортовий сталевий гарячекатаний штабовий. *Сортамент* [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Держспоживтсандарт України, 2007. 14 с.
9. ДСТУ 8540:2015 Прокат листовий гарячекатаний. *Сортамент* [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 11 с.
10. ДСТУ 8769:2018 Кутики сталеві гарячекатані нерівнополічні. *Сортамент* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 10 с.
11. ДСТУ Б В.2.6-8-95 Будівельні конструкції. Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій. *Технічні умови* [Чинний від 1996-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1996. 16 с.
12. Крет І. З., Петрушка Т. О., Товкан О. Е. Техніко-технологічна база та її оновлення як складник економічного розвитку підприємства. *Бізнес-навігатор*. 2019. Вип. 2 (51). С. 75–79.

13. Ahmed S., Abdelhamid H., Ismail B., Ahmed F. Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal of Computational Mechanics*. 2021. Vol. 29. Iss. 4–6. P. 303–344. DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461>
14. Bannikov D., Radkevich A., Nikiforova N. Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 348–354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348>
15. Bofang Z. *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>
16. Chen L. P., Yang, Y. A. New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2020. Vol. 6, No. 12. P. 1520–1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>
17. Fialko S., Karpilovskyi V. Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*. 2018. Vol. 6, No. 4. P. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408>
18. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*. 2019. No. 2 (80). P. 144–152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>
19. Kumar A., Shitole P., Ghosh R., Kumar R., Gupta A. Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*. 2019. Vol. 233, No. 8. P. 823–838. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954411919853918>
20. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. *The finite element method for solid and structural mechanic*. Elsevier LTD, 2014. 672 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26332-x>

L. I. KLOCHKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Faculty «Construction, Architecture and Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 558 44 16, e-mail [leoniddzmk@gmail.com](mailto:leoniddzmk@gmail.com), ORCID 0009-0009-3478-6076

## Bearing Steel Structures for Installation of Railway Strain Gauge Scales

**Purpose.** The main purpose of the publication is to compare the main technical and economic indicators of the two proposed structural variants of the support system for railway strain gauge scales for four-axle wide gauge railcars. This is due to the need to reconstruct and modernize the fixed assets of an industrial enterprise, in particular, to overhaul and replace old railway scales with modern electronic strain gauge scales. Also, the purpose of the work is related to the need to expand the range of railway cars for which the possibility of weighing is provided, including transport units of the foreign car fleet. **Methodology.** To achieve this goal, we analyzed the modern types of railroad cars for freight transportation, determined the main components of strain gauge scales for weighing the main types of cars, and developed a special support system to support the scale platform. The support system is provided in two design variants - with one spatial support frame and two separate flat support frames. Using the domestic design and computing complex SCAD, we built finite element models for both proposed design options. Based on the analysis of their stress-strain state, rational cross-sections were selected for each structural element, and the total mass was determined. **Findings.** A comparative analysis of the two developed structural solutions for the support system for modern railway strain gauges has revealed that the variant with two separate bearing frames has a lower weight by about 40 % compared to the variant with one spatial bearing frame. However, the manufacturability of its production is somewhat lower, since it involves 10 structural elements compared to 7 for variant No. 1. **Originality.** The numerical analysis made it possible to theoretically substantiate a more rational and efficient design solution for the support system for modern railway strain gauge scales. **Practical value.** A constructive variant of the steel support system has been developed and proposed for practical implementation, which is the most effective in terms of its technical and economic indicators for the existing conditions of an existing industrial enterprise. The developed design option was also coordinated with the project of major reconstruction of the building for weighing railroad cars.

**Keywords:** freight car; steel support system; railway strain gauge scales; finite element method; SCAD design and computer complex

## REFERENCES

1. Bannikov, D. O. (2018). Usage of construction-oriented software scad for analysis of work of machine-building structures. *Science and Transport Progress*, 1(73), 98-111. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123406> (in Ukrainian)
2. Bezsalyi, V. M., & Bannikov, D. O. (2019). Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 16, 20-29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428> (in Ukrainian)
3. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob`yektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Zi zminamy № 1 ta № 2, 70 DBN V.1.2-2:2006.* (2007). (in Ukrainian)
4. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob`yektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi zminoiu № 1, 36 DBN V.1.2-14:2018.* (2018). (in Ukrainian)
5. *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. Zi zminoiu № 1, 220 DBN V.2.6-198:2014.* (2014). (in Ukrainian)
6. *Kutyky stalevi hariachekatani rivnopolychni. Sortament, 10 DSTU 2251:2018.* (2018). (in Ukrainian)
7. *Shvelery stalevi hariachekatani. Sortament, 10 DSTU 3436-96.* (2004). (in Ukrainian)
8. *Prokat sortovij stalevij garjachekatannij shtabovij. Sortament, 14 DSTU 4747:2007 (EN 10058:2003, NEQ).* (2007). (in Ukrainian)
9. *Prokat lystovyi hariachekatanyi. Sortament, 11 DSTU 8540:2015.* (2016). (in Ukrainian)
10. *Kutyky stalevi hariachekatani nerivnopolychni. Sortament, 10 DSTU 8769:2018.* (2018). (in Ukrainian)
11. *Budivelni konstruksii. Profili stalevi hnuti zamknuti zvarni kvadratni i priamokutni dlia budivelnykh konstruksii. Tekhnichni umovy, 16 DSTU B V.2.6-8-95.* (1996). (in Ukrainian)
12. Kret, I. Z., Petruska, T. O., & Tobkan, O. Ye. (2019). The technical and technological base and its renewal as a component of the economic development of the enterprise. *Business navigator*, 2(51), 75-79. (in Ukrainian)
13. Ahmed, S., Abdelhamid, H., Ismail, B., & Ahmed, F. (2021). Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal Of Computational Mechanics*, 29(4-6), 303-344. DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461> (in English)
14. Bannikov, D., Radkevich, A., & Nikiforova, N. (2019). Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*, 968, 348-354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348> (in English)
15. Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering.* Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
16. Chen, L. P., & Yang, Y. A. (2020). New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 6(12), 1520-1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174> (in English)
17. Fialko, S., & Karpilovskyi, V. (2018). Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*, 6(4), 173-180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408> (in English)
18. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of short-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*, 2(80), 144-152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)
19. Kumar, A., Shitole, P., Ghosh, R., Kumar, R., & Gupta A. (2019). Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*, 233(8), 823-838. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954411919853918> (in English)
20. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox D. D. (2014). *The finite element method for solid and structural mechanics.* Elsevier LTD. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26332-x> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.02.2024

Прийнята до друку: 10.06.2024

## УДК 658.78:624.014.2

Є. А. МІСЮРА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Фак. «Будівництво, архітектура та інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 933 52 82, ел. пошта [udgine200933@gmail.com](mailto:udgine200933@gmail.com), ORCID 0009-0003-1909-4588

## Визначення ефективності сталевих конструкцій покриття складської будівлі

**Мета.** Основною метою цієї статті є зіставлення за основними техніко-економічними показниками двох запропонованих конструктивних варіантів сталевих покриттів для складської будівлі класу В+ у місті Дніпро. Актуальність роботи пов'язана з постійним збільшенням обсягів і темпів вантажних транспортних перевезень як в усьому світі, так і в Україні, особливо останнім часом. Це потребує створення нових та розширення наявних складських площ різних видів. У свою чергу, це призводить до необхідності створення таких несних конструкцій для складських площ, які б були здатні перекривати значні прогони і при цьому забезпечували б мінімальні витрати на їх будівництво та експлуатацію. **Методика.** Для досягнення цієї мети проаналізовано сучасні класифікації складських будівель за вітчизняними стандартами та міжнародними підходами, визначено клас розглядуваної будівлі за цими двома методиками та розроблено два конструктивні варіанти сталевих покриттів – на основі несного ригеля у вигляді кроквяної ферми і на основі балково-рамної схеми. За допомогою вітчизняного проектного комплексу Ліра-САПР побудовано скінченноелементні моделі для обох запропонованих конструктивних варіантів. На основі аналізу їх напружено-деформованого стану підібрано раціональні перерізи для кожного конструктивного варіанта, а також розраховано загальну масу та вартість. **Результати.** Проведений порівняльний аналіз двох розроблених конструктивних рішень для сталевих покриттів складської будівлі дозволив з'ясувати, що варіант із застосуванням балково-рамної системи має приблизно на 10 % меншу масу та вартість. Також технологічність його виготовлення є більш високою ніж варіанта із застосуванням кроквяної ферми. **Наукова новизна.** У результаті проведення чисельного аналізу теоретично обґрунтовано більш раціональне та ефективне конструктивне рішення для сталевих покриттів складської будівлі в місті Дніпро. **Практична значимість.** Розроблено та запропоновано для практичної реалізації конструктивний варіант сталевих покриттів, який за своїми техніко-економічними показниками є найефективнішим для умов сучасного промислового підприємства. Також розроблений конструктивний варіант складської будівлі класифіковано відповідно до вітчизняних і міжнародних сучасних підходів.

*Ключові слова:* складська будівля; сталеве покриття; кроквяна ферма; балково-рамна система; метод скінченних елементів; проектний комплекс Ліра-САПР

### Вступ

Сьогодні залізничні перевезення є одним із найефективніших видів транспортних перевезень як в Україні [1, 13, 14], так і у світі [10, 18]. При цьому в міру розширення співпраці між окремими країнами обсяги й потужність таких перевезень тільки набирає обертів.

В Україні залізничний транспорт узагалі вважають провідною галуззю в системі перевезень, адже, за даними деяких фахівців, його обсяги охоплюють до 80 % вантажних і до 40 % пасажирських перевезень відносно загальних обсягів перевезень усіма видами транспорту. Загальна довжина залізничної мережі України сягає 22 тис. км, і приблизно 50 % цієї мережі працює на електричному струмі. Обсяг пере-

везень на рік у 4–5 разів вищий ніж для багатьох розвинених країн європейського регіону.

До того ж важливим чинником є той факт, що по території України пролягають найбільш потужні транс'європейські шляхи: Захід (Європа) – Схід (Азія), Північ (Балтика) – Південь (Чорне море). Також залізниці України тісно пов'язані із залізницями прикордонних країн – Польщі, Румунії, Молдови, Словаччини, Угорщини. Це дозволяє фактично забезпечувати транспортно-складськими операціями основні порти Чорноморсько-Азовського басейну.

Також слід відзначити, що по залізничній мережі України проходять три основні транспортні коридори № 3, 5, 9, а через порт у місті Ізмаїл відбувається товарообіг із транспортним

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

коридором № 7. Крім цього, активно набирають обертів транспортні сполучення по коридору ТРАСЕКА (Європа – Кавказ – Азія). Така потужна й розвинена система потребує потужного та розвиненого складського господарства, здатного задовольнити обсяги й терміни товарообігу.

Наявність проміжної складської ланки у сфері вантажних перевезень пов'язана з необхідністю компенсації коливань обсягу товарів, їх постачання і споживання. Як зазначено в роботі [11], складське господарство має доволі складну та розгалужену структуру, яка потребує складного апарату управління, побудованого на сучасних теоретичних засадах логістики [5].

Чітка класифікація складських будівель у вітчизняній практиці відсутня. Частіше за все

види складів розрізняють залежно від їх функціонального призначення (основна класифікація), форми власності, спеціалізації асортименту товарів, режиму зберігання, виду транспортних сполучень, ступеня механізації складських операцій та місця розташування. Наприклад, складські підприємства за їх функціональним призначенням поділяють на постачальницькі склади, виробничі склади, склади збуту і склади обслуговування.

У міжнародній практиці домінують класифікація складських будівель за низкою узагальнених критеріїв. При цьому виділяють шість класів: А+, А, В+, В, С, D. Приклади реальних будівель таких складів подано на рис. 1, а їх загальний опис та особливості – у табл. 1.

*a – a**в – c**д – e**б – b**z – d**e – f*

Рис. 1. Основні типи складських будівель за міжнародною класифікацією:  
*a* – клас А+; *б* – клас А; *в* – клас В+; *z* – клас В; *д* – клас С; *e* – клас D

Fig. 1. The main types of storage buildings according to the international classification:  
*a* – class А+; *b* – class А; *c* – class В+; *d* – class В; *e* – class С; *f* – class D

## Опис складських будівель за міжнародною класифікацією

## Description of storage buildings according to the international classification

A+	A
<p>Вища категорія на зразок своєрідних «президентських апартаментів» серед будівель цього типу. Це одноповерхові будівлі з повністю вільним внутрішнім простором, як правило, прямокутної в плані форми. Висота поверху не менше 13 м для складування в 6–7 ярусів, відстань між рядами колон не менше 24 м. Несні конструкції – високоякісні сучасні сталеві легкі. Ворота докового типу на 500 м<sup>2</sup> із зовнішніми вантажними майданчиками з регульованою висотою підйому. Розташування поруч із транспортною магістраллю, довжина під'їзду не більше 4 км. Обов'язкова наявність окремої залізничної вітки зі спеціальною залізничною рампою.</p>	<p>Це одноповерхові будівлі, які мають повністю вільний внутрішній простір. Побудовані після 1994 року. Висота поверху не менше 10 м для складування в 5 ярусів, відстань між рядами колон не менше 24 м. Несні конструкції – сталеві звичайні. Ворота докового типу на 700 м<sup>2</sup> із зовнішніми вантажними майданчиками. Розташування поруч із транспортною магістраллю, наявність під'їзду для вантажного автотранспорту. Бажана наявність окремої залізничної вітки.</p>
B+	B
<p>Будівля спеціально споруджена або переобладнана з будівлі промислового призначення, одноповерхова, із висотою поверху не менше 8 м, відстань між рядами колон не менше 12 м. Ворота докового типу на 1 000 м<sup>2</sup>. Передбачений пандус для машин вантажного типу. Розташування поблизу з транспортною магістраллю, під'їзд повинен мати хороший стан покриття. Наближеність до залізничної вантажної станції.</p>	<p>Будівля спеціально споруджена або реконструйована, багатоповерхова, із висотою поверху від 4 до 8 м. Наявність вантажних міжповерхових ліфтів не менше 3 т на 2 000 м<sup>2</sup>. Покриття підлоги може бути асфальтове. Передбачений пандус для машин вантажного типу. Розташування поблизу з транспортною магістраллю, під'їзд повинен мати хороший стан покриття. Наближеність до залізничної вантажної станції.</p>
C	D
<p>Це утеплений ангар або капітальна промислова будівля з висотою поверху не менше 4 м. Загальна поверховість будівлі не обмежена, проте обов'язкова наявність вантажних ліфтів. Покриття підлог відсутнє. Ворота обов'язково розташовані на нульовому рівні, передбачена можливість прямого заїзду вантажного транспорту всередину будівлі. Будівля обладнана системою водопостачання та каналізації. Розташування на відстані до 30 км до транспортної магістралі.</p>	<p>Це найбільш невибагливі будівлі з точки зору вимог до обладнання. Для цієї категорії можливе використання підвальних приміщень, ангарів, промислових і виробничих приміщень, а також будь-яких нежитлових приміщень. Вимоги до внутрішнього устаткування мінімальні: наявність освітлення і кондиціювання. Будівля повинна мати під'їзд для вантажного автотранспорту. Розташування будівлі не обмежено.</p>

Зауважимо, що відповідно до національного класифікатора України [9], який був чинним ще до недавнього часу, складські будівлі становили одну групу з промисловими будівлями – 125, а самі складські будівлі мали за цим класифікатором підкласи – 1252.8 і 1252.9. При цьому такі будівлі не пов'язані з об'єктами транспорту взагалі і транспортними будівлями та спорудами зокрема [2], що викликає певні питання. Відповідно до нового класифікатора

[12], який нещодавно набув чинності, складські будівлі як окремий різновид будівель узагалі відсутні, натомість до класу 1252 разом із холодильниками введені і спеціальні склади.

Проте будівлі складів – це повноцінний самостійний різновид будівель, який має свої закономірності розрахунку та проектування. Особливо важливою при цьому є конструкція покрівлі [4, 16, 19], адже саме вона має забезпечити як перекриття необхідного прогону

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

(створення належного вільного простору в будівлі), так і прийнятну вагу (можливість створення несного каркасу будівлі в подальшому).

### Мета

Зважаючи на вищевикладене, основною метою дослідження є визначення ефективного конструктивного рішення покриття для складської будівлі.

### Методика

За об'єкт дослідження взято окрему складську будівлю, розташовану в місті Дніпро. Будівля призначена для зберігання невеликого штучного вантажу непродовольчого типу, тому не потребує холодильних камер. Для здійснення операцій складування в будівлі можливе переміщення навантажувача. За міжнародною класифікацією розглядувана складська будівля належить до типу В+.

З об'ємно-планувальної точки зору будівля має проліт 18 м та загальну довжину 42 м. Будівля одноповерхова з висотою поверху 8 м. Огороджувальні конструкції покриття являють собою сендвіч-панелі по сталевих ригелях.

У ході дослідження було зіставлено 2 конструктивні варіанти:

- варіант № 1 – покриття виконано у вигляді сталеві ферми (рис. 2, а);
- варіант № 2 – покриття виконано у вигляді прокатної балково-рамної системи (рис. 2, б).

Для проведення досліджень використано чисельний метод будівельної механіки – метод скінченних елементів, який набув поширення в аналізі складних інженерних систем [15, 17, 20]. Для аналізу використано вітчизняний програмний комплекс Ліра-САПР [3].

Як навантаження взято власну вагу елементів конструкції, снігове й вітрове навантаження відповідно до чинного стандарту [6]. Підбір поперечних перерізів виконано на основі чинних стандартів [7, 8].

### Результати

Побудовані скінченноелементні моделі в програмному комплексі Ліра-САПР для обох розглядуваних конструктивних варіантів складської будівлі наведено на рис. 3. Моделі являють собою стрижневі системи.

Для коректного відображення роботи каркасів в обох конструктивних випадках змодельовано не тільки окрему поперечну несну раму, а й повністю весь сталевий каркас разом з елементами в'язей.

На рис. 4 представлено отримані зображення деформацій від заданого навантаження, а на рис. 2 – підібрані поперечні перерізи основних конструктивних елементів поперечної несної рами.

У цілому напружено-деформований стан для обох розглянутих конструктивних варіантів поперечного перерізу складської будівлі є доволі рівномірний. Значення отриманих максимальних вертикальних деформацій для конструктивного варіанта № 1 становить 46,3 мм, а для конструктивного варіанта № 2 – 57,2 мм.

Отримана загальна маса поперечної несної рами для розглядуваних варіантів становить:

- варіант № 1 – 57,29 т;
- варіант № 2 – 52,47 т.

Тому перевагу має варіант № 2.

Із технологічної точки зору варіант № 2 також є більш раціональним, оскільки містить спрощене конструктивне рішення несного ригеля покриття у вигляді балки. Багатодільність кроквяної ферми для варіанта № 1 підвищує її вартість та ускладнює процес виготовлення.

Оцінимо динаміку зміни вартості обох конструктивних варіантів упродовж 2018–2024 рр., адже саму роботу виконано ще у 2018 році. Оскільки в обох конструктивних варіантах використано зовсім різні сталеві профілі як за видами, так і за типорозмірами, то візьмемо середню вартість. Узагальнені вартісні показники наведено в табл. 2.

Таблиця 2

### Вартість конструктивних варіантів

Table 2

#### Cost of structure variants

Рік	Ціна грн/1 т	Вартість (тис. грн) конструктивного варіанта	
		№ 1	№ 2
2018	23 000	1 318	1 207
2022	47 000	2 693	2 466
2023	54 000	3 094	2 833
2024	60 000	3 437	3 148

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

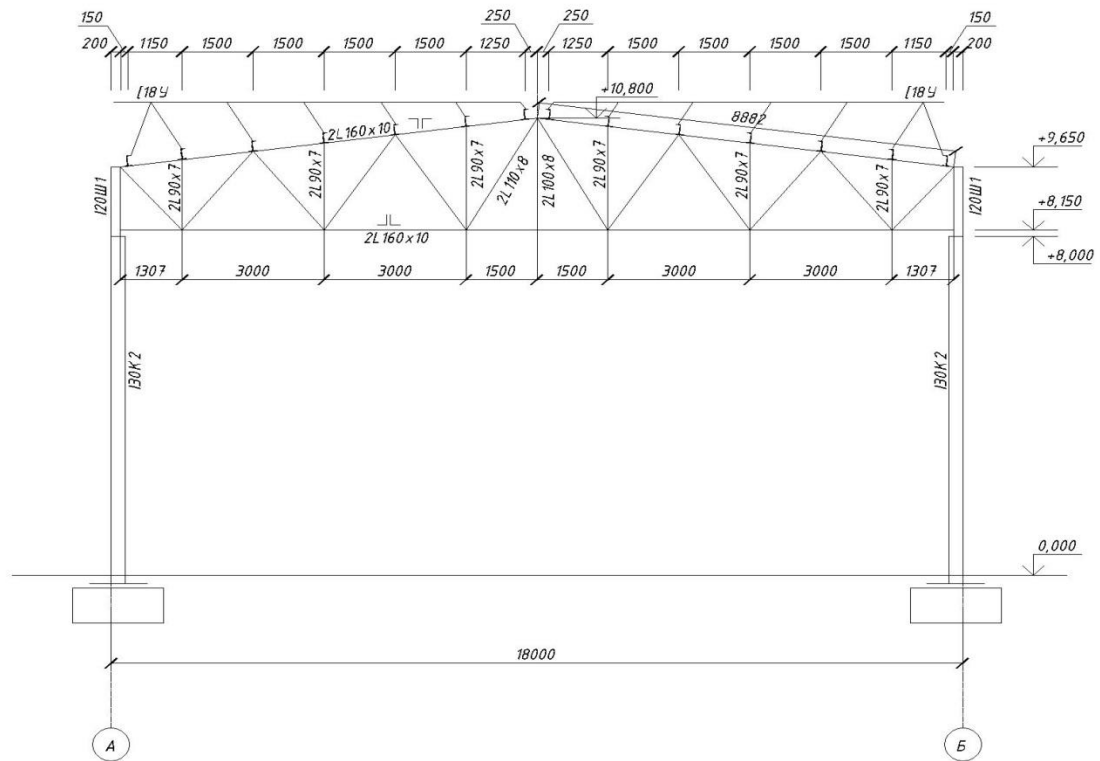
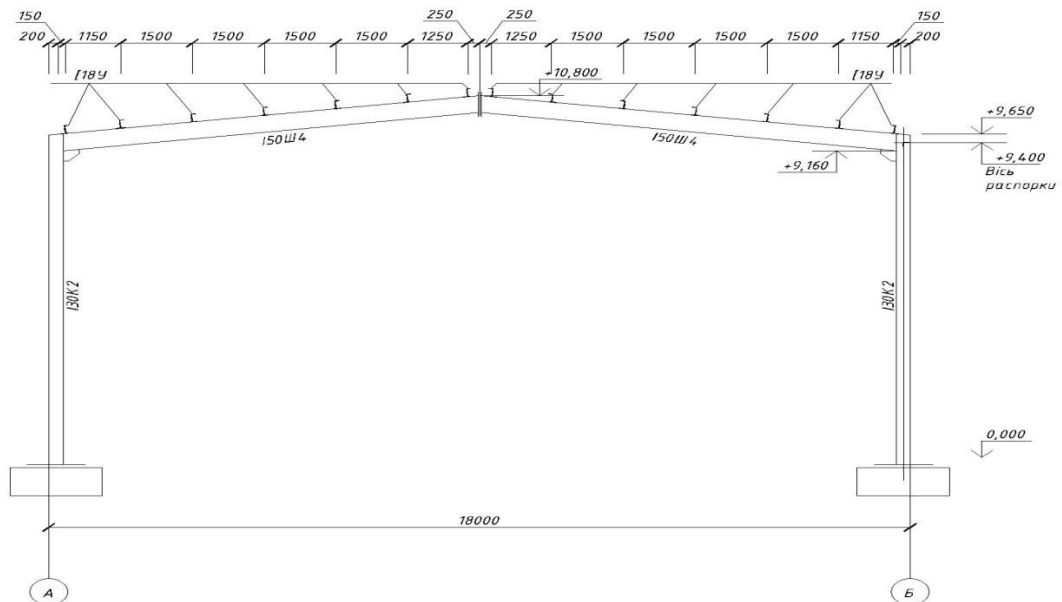
*a – a**б – б*

Рис. 2. Конструктивне рішення складської будівлі:  
*a* – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 2. Structural solution of storage building:  
*a* – variant No. 1; *b* – variant No. 2

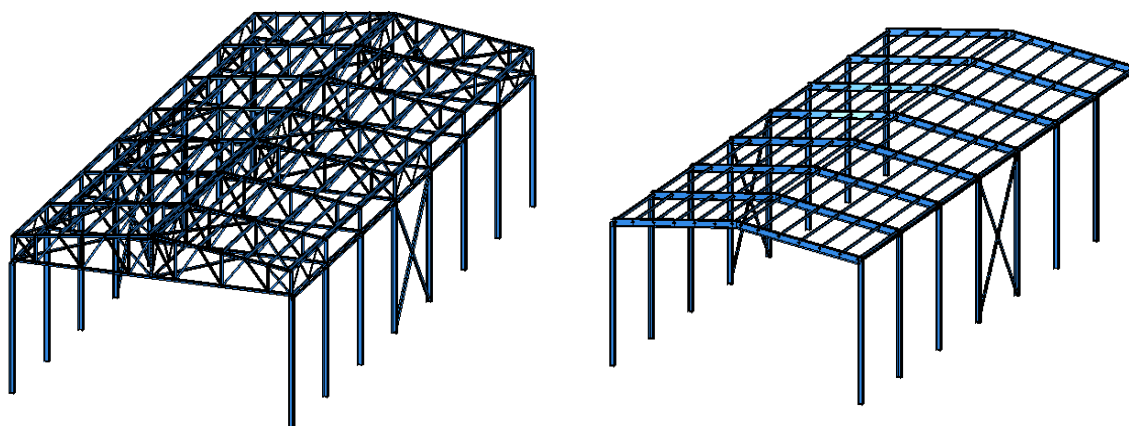
*a – a**б – б*

Рис. 3. Розрахункова модель складської будівлі:  
*a* – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 3. Calculation model of storage building:  
*a* – variant No. 1; *b* – variant No. 2

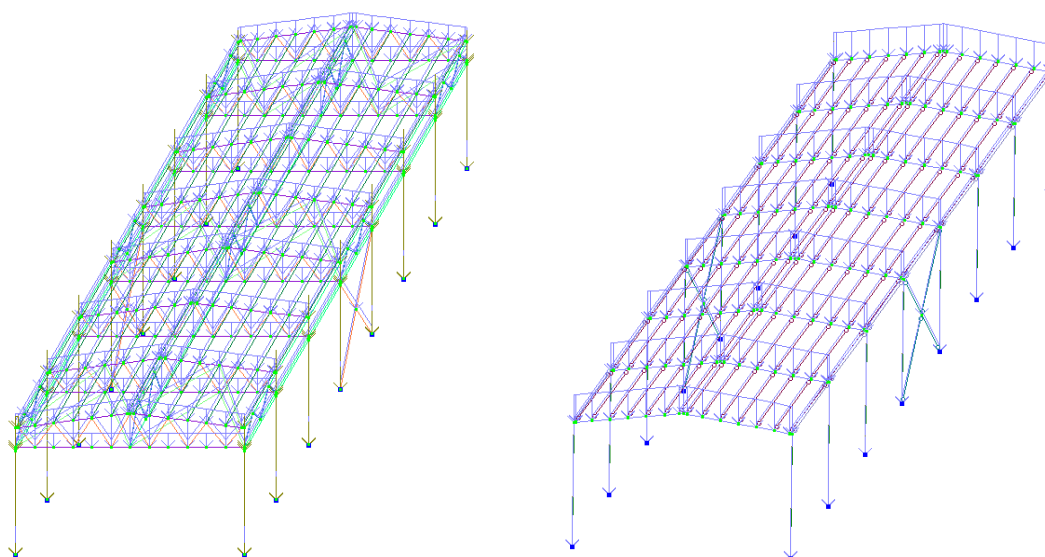
*a – a**б – б*

Рис. 4. Деформовані схеми складської будівлі:  
*a* – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 4. Deformed schemes of storage building:  
*a* – variant No. 1; *b* – variant No. 2

### Наукова новизна та практична значимість

У цій публікації вперше визначено тип вітчизняної складської будівлі, розташованої в місті Дніпро, за міжнародною класифікацією

складських будівель. Також визначено клас цієї будівлі за вітчизняними Національними класифікаторами 2000 і 2023 років. Проведено теоретичне зіставлення двох розроблених конструктивних варіантів для покриття розглядуваної складської будівлі. При цьому з наукової точки

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

зору обґрунтовано конструктивні та масові показники кожного з варіантів за допомогою сучасного чисельного методу скінченних елементів.

У практичному аспекті остаточно обраний конструктивний варіант доопрацьовано під конкретні місцеві умови виробничого підприємства. Отримані результати можуть бути впроваджені в практику проектування.

## Висновки

Проведений порівняльний аналіз двох розроблених конструктивних рішень для сталевих покриттів складської будівлі в місті Дніпро дозволив з'ясувати:

1. Конструктивний варіант із використанням як несного ригеля сталевий балково-рамної системи має приблизно на 10 % нижчу масу та вартість порівняно з конструктивним варіантом із використанням як несного ригеля сталевий ферми.

2. Вартість такого конструктивного варіанта за цінами 2018 року становить приблизно 1,5 млн грн за одну поперечну раму. За цінами 2024 року ця вартість становить близько 3,5 млн грн.

3. Остаточно обраний конструктивний варіант може бути рекомендований до практичної реалізації в умовах сучасного промислового підприємства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / за ред. В. О. Пінчук, Г. С. Прокудіна. Дніпро : Пороги, 2021. 536 с.
2. Банніков Д. О., Нікіфорова Н. А., Косячевська С. М. Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 21. С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221>
3. Барабаш М. С., Сорока М. М., Сур'янінов М. Г. *Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра-САПР* : монографія. Київ : Екологія, 2018. 248 с.
4. Безсалий В. М., Банніков Д. О. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. № 16. С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>
5. Вавулін О. І. Управління складським господарством будівельного підприємства на засадах логістики. *Економіка і суспільство*. 2017. Вип. 10. С. 194–200.
6. *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. 70 с.
7. *ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі зміною № 1* [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд, 2018. 36 с.
8. *ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1* [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 220 с.
9. *ДК 018-2000. Державний класифікатор будівель та споруд*. Київ : Держстандарт України, 2000. 83 с.
10. Мельник З., Буковський А., Гринишин М., Пінчук В., Яремчук П. *Залізничні вантажні перевезення* : монографія. BRDO, 2020. 134 с.
11. Момоток М. М. Організація складського господарства на сучасному етапі. *Управління розвитком*. 2014. № 8. С. 117–119.
12. *НК 018:2023. Національний класифікатор України. Класифікатор будівель і споруд* [Чинний від 2024-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2023. 17 с.
13. Новак В., Кириленко О., Розумова К., Ігнатюк В. Організація міжнародних перевезень вантажів основними видами транспорту (огляд). *Наукоємні технології*. 2022. Вип. 1 (53). С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.53.16510>
14. *Проблеми організації, управління та підвищення ефективності транспортних перевезень* : монографія / за ред. Л. М. Савчук, Г. С. Прокудіна. Дніпро : Пороги, 2021. 300 с.
15. Ahmed S., Abdelhamid H., Ismail B., Ahmed F. Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European*

- Journal of Computational Mechanics*. 2021. Vol. 29. Iss 4-6. P. 303–344.  
DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461>
16. Bannikov D., Radkevich A., Nikiforova N. Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 348–354.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348>
  17. Bofang Z. *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>
  18. Čižiūnienė K., Matijošius J., Liebuviene J., Sokolovskij E. Comparison of the relative importance of factors affecting the conveyance of bulk and liquid cargo. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Iss 3. P. 1–24.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app14031151>
  19. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*. 2019. No. 2 (80). P. 144–152.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>
  20. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier LTD, 2014. 672 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26332-x>

Ye. A. MISIURA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Fac. «Construction, Architecture and Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 933 55 82, e-mail [udgine200933@gmail.com](mailto:udgine200933@gmail.com), ORCID 0009-0003-1909-4588

## Determination of the Efficiency of Steel Structures of a Warehouse Building Roof

**Purpose.** The main purpose of this article is to compare the main technical and economic indicators of two proposed structural variants of steel coverings for a class B+ warehouse building in the city of Dnipro. The relevance of the work is related to the constant increase in the volume and pace of freight transportation both globally and in Ukraine, especially in recent years. This requires the creation of new and expansion of existing warehouses of various types. In turn, this leads to the need to create such load-bearing structures for storage areas that would be able to cover significant spans and at the same time ensure minimal costs for their construction and operation.

**Methodology.** To achieve this goal, we analyzed modern classifications of warehouse buildings according to national standards and international approaches, determined the class of the building in question according to these two methods, and developed two structural options for steel roofing - based on a load-bearing beam in the form of a truss truss and based on a beam-frame scheme. Finite element models for both proposed structural options were built using the domestic design complex Lira-CAD. Based on the analysis of their stress-strain state, rational cross-sections were selected for each design option, and the total weight and cost were calculated. **Findings.** A comparative analysis of the two developed structural solutions for the steel roof of a warehouse building revealed that the variant with the use of a beam-frame system has about 10% less weight and cost. Also, its manufacturability is higher than that of the truss system. **Originality.** As a result of the numerical analysis, a more rational and efficient design solution for the steel roof of a warehouse building in the city of Dnipro was theoretically substantiated.

**Practical value.** A constructive variant of the steel coating has been developed and proposed for practical implementation, which, in terms of its technical and economic indicators, is the most effective for the conditions of a modern industrial enterprise. Also, the developed constructive variant of the warehouse building is classified in accordance with domestic and international modern approaches.

**Keywords:** warehouse building; steel coating; truss truss; beam-frame system; finite element method; Lira-CAD design complex

### REFERENCES

1. Pinchuk, V. O., & Prokudina, G. S. (Eds.). (2021). *Aktualni napriamy rozvytku tekhnichnoho ta vyrobnychoho potentsialu natsionalnoi ekonomiky: monohrafiia*. Dnipro: Porogi. (in Ukrainian)
2. Bannikov, D. O., Nikiforova, N. A., & Kosiachevska, S. M. (2022). Modern state of classification of transport building structures in Ukraine. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 21, 35-43.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221> (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

3. Barabash, M. S., Soroka, M. M., & Surianinov, M. G. (2018). *Neliniina budivelna mekhanika z PK Lira-SAPR*. Kyiv: Ecology. (in Ukrainian)
4. Bezsalyi, V. M., & Bannikov, D. O. (2019). Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 16, 20-29.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428> (in Ukrainian)
5. Vavulin, O. I. (2017). Management warehouse management of a building enterprise on the basis of logistics. *Economy and society*, 10, 194-200. (in Ukrainian)
6. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob`yektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Zi zminamy № 1 ta № 2, 70 DBN V.1.2-2:2006. (2006).* (in Ukrainian)
7. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obiektyv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi zminoiu № 1, 36 DBN V.1.2-14:2018. (2018).* (in Ukrainian)
8. *Stalevi konstruktsiji. Normi proektuvanja. Zi zminoiu № 1, 220 DBN V.2.6-198:2014. (2014).* (in Ukrainian)
9. *Dergavnij klassifikator budivel ta sporud, 83 DK 018-2000. (2000).* (in Ukrainian)
10. Melnyk, Z., Bukovskiy, A., Hrynyshyn, M., Pinchuk, V., & Yaremchuk, P. (2020). *Zaliznychni vantazhni perevezennia*. BRDO. (in Ukrainian)
11. Momotok, M. M. (2014). Organization of storage facilities at the modern stage. *Development management*, 8, 117-119. (in Ukrainian)
12. *Natsionalnij klassifikator Ukraini. Klassifikator budivel i sporud, 17 NK -18:2023. (2023).* (in Ukrainian)
13. Novak, V., Kirilenko, O., Rozumova, K., & Ignatjuk, V. (2022). Organization of international cargo transportation by main types of transport (overview). *Science-Based Technologies*, 53(1), 70-76.  
<https://doi.org/10.18372/2310-5461.53.16510> (in Ukrainian)
14. Savchuk, L. M., & Prokudina, G. S. (Eds.). (2021). *Problemy orhanizatsii, upravlinnia ta pidvyschennia efektyvnosti transportnykh perevezhen*. Dnipro : Porogi. (in Ukrainian)
15. Ahmed, S., Abdelhamid, H., Ismail, B., & Ahmed, F. (2021). An Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal of Computational Mechanics*, 29(4-6), 303-354.  
DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461> (in English)
16. Bannikov, D., Radkevich, A., & Nikiforova, N. (2019). Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*, 968, 348-354.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348> (in English)
17. Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
18. Čižiūnienė, K., Matijošius, J., Liebuviene, J., & Sokolovskij, E. (2024). Comparison of the Relative Importance of Factors Affecting the Conveyance of Bulk and Liquid Cargo. *Applied Sciences*, 14(3), 1-24.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app14031151> (in English)
19. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of short-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*, 2(80), 144-152.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)
20. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox D. D. (2014). *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier LTD. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26332-x> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.02.2024

Прийнята до друку: 07.06.2024

## УДК 624.131.53

С. О. ОЛІШЕВСЬКА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 482 36 14, ел. пошта Olishevskas.s.o@nmu.one, ORCID 0000-0003-0821-1091

## Огляд тенденцій виникнення зсувів у світі та в Україні

**Мета.** Основною метою роботи є систематизація та поглиблений аналіз сучасних тенденцій у сфері запобігання виникненню та розвитку зсувів на території різних країн світу та особливо в Україні, а також розгляд та висвітлення основних факторів, які спричиняють зсуви, та детальне вивчення методів їх передбачення й мінімізації відповідних ризиків. **Методика.** Зсуви є серйозною геологічною небезпекою. Нині спостерігається тенденція до збільшення частоти прояву зсувів унаслідок техногенного впливу у всьому світі. Природні процеси геологічного середовища разом із розробкою родовищ корисних копалин, масовою та масштабною забудовою земельних територій призводять до активізації процесів зсувів. Причиною утворення зсувів є порушення рівноваги між зсувною силою тяжіння та утримувальними силами. **Результати.** Проаналізовано кількість виникнення зсувів за останні роки та детально розглянуто їх розподіл за різними континентами. Визначено та систематизовано причини утворення зсувів як в Україні, так і в інших країнах світу. Розглянуто актуальність проблеми зсувних явищ в Україні, а також наголошено на необхідності прогресивного вивчення процесів зсувоутворення з метою їх запобігання. Підкреслено важливість постійного моніторингу за стійкістю укосів та схилів для зниження ризиків і підвищення безпеки. **Наукова новизна.** Проведено комплексне дослідження сучасних тенденцій у виникненні та розвитку зсувів на території різних країн світу та зокрема України з урахуванням останніх досягнень в галузі геології, геомеханіки та будівництва. На підставі аналізу зроблено висновки про необхідність прогресивного вивчення зсувних процесів із метою їх запобігання. **Практична значимість.** Результати проведеного огляду тенденцій щодо запобігання зсувам можуть бути ефективно використані для поліпшення стратегій управління природними ризиками, а також для розробки нових та вдосконалення наявних інженерних заходів, спрямованих на запобігання зсувам. Це, у свою чергу, сприятиме підвищенню рівня безпеки як населення, так і критично важливої інфраструктури.

*Ключові слова:* зсув; моніторинг; ґрунт; порода; тенденція до запобігання виникненню зсувів; зміна клімату

## Вступ

Зсув – зміщення мас гірських порід по схилу під впливом власної ваги та додаткового навантаження внаслідок підмиву схилу, перезволоження, сейсмічних поштовхів та інших процесів.

Зсуви можуть виникати на будь-якій місцевості, завдати значних збитків як у вигляді людських жертв, так і в матеріальному плані.

Зсуви зазвичай виникають на схилах, складених водотримкими (глинистими) і водоносними породами. Зміщення блоків породи обсягом у десятки кубічних метрів і більше на крутих схилах відбувається внаслідок змочування поверхонь відриву підземними водами.

Головними причинами зсувів слід вважати три групи факторів [5]:

- зміна зовнішньої форми і висоти схилу;
- зміна структури і послаблення фізичних

властивостей порід, що складають схил, за рахунок процесів вивітрювання, зволоження підземними, дощовими, талими і господарськими водами, за рахунок механічного винесення часток плинною водою і виникнення в породі порожнин (суфозія);

– додатковий тиск на породи, які складають схил, за рахунок: гідродинамічного тиску під час фільтрації води у бік схилу, гідростатичного тиску води в тріщинах і порах породи, штучного статичного й динамічного навантаження на схил, а також сучасних тектонічних і сейсмічних явищ.

## Мета

У роботі передбачено: систематизувати та проаналізувати сучасні тенденції у виникненні та розвитку зсувів на території різних країн

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

світу; висвітлити основні фактори, що спричиняють зсуви, методи їх передбачення та мінімізації ризиків.

### Методика

Зсуви є серйозною геологічною небезпекою. Нині спостерігається тенденція збільшення частоти прояву зсувів унаслідок техногенного впливу у всьому світі.

Природні процеси геологічного середовища разом із розробкою родовищ корисних копалин, масовою та масштабною забудовою земельних територій призводять до активізації процесів зсувів.

Причиною утворення зсувів є порушення рівноваги між зсувною силою тяжіння та утримувальними силами.

Це порушення викликають такі причини:

- збільшення крутості схилу внаслідок підмивання водою;
- ослаблення міцності порід унаслідок вивітрювання або перезволоження опадами та підземними водами;
- вплив сейсмічних поштовхів;
- будівельна та господарська діяльність.

Також можна відзначити зростання кількості та інтенсивності зсувів у зв'язку з глобальними змінами клімату.

Збільшення температур, танення льодовиків та зміни водного режиму призводять до зниження стійкості схилів та виникнення нових точок потенційного руйнування.

Очікується, що подальша різка зміна клімату та підвищення температури спричинять ще більше зсувів, особливо в гірських районах зі снігом та льодом.

Щоб оцінити ступінь активізації зсувних процесів у світі, було проаналізовано статистику цих явищ протягом останніх 50 років.

### Результати

Із кінця ХХ століття і до наших днів простежується тенденція збільшення кількості зсувів унаслідок прогресування діяльності людини (вирубування лісів, порушення державних норм проведення відкритих гірничих та будівельних робіт), а також процесу урбанізації, що активно розвивається зараз (рис. 1).

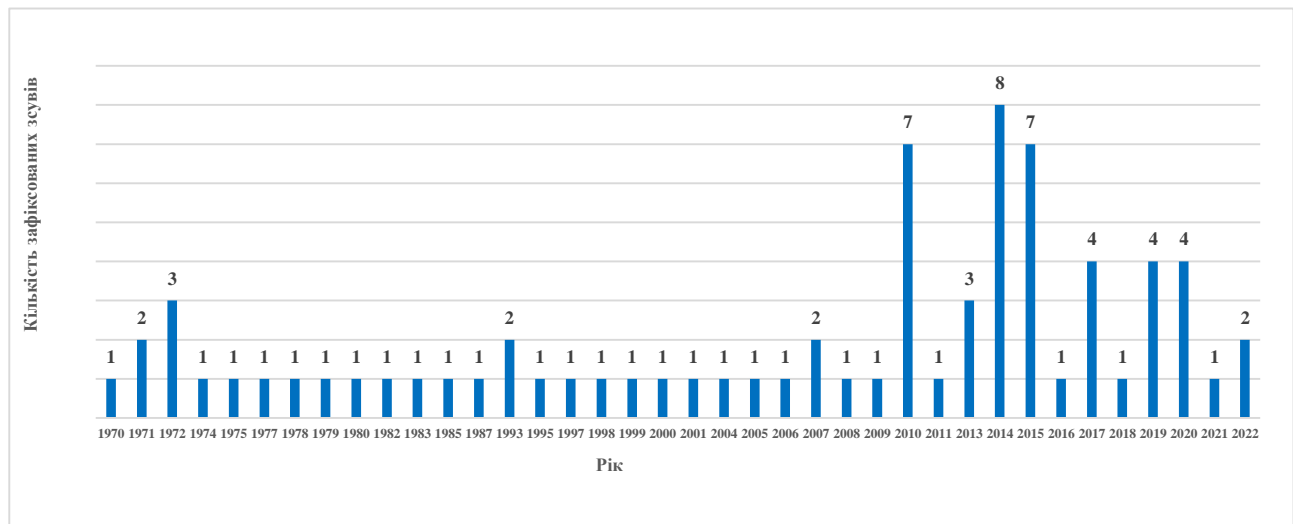


Рис. 1. Кількість зафіксованих зсувів за останні 50 років у світі

Fig. 1. Number of recorded landslides over the past 50 years in the world

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Також проведено аналіз розподілу зсувів за континентами світу (рис. 2).

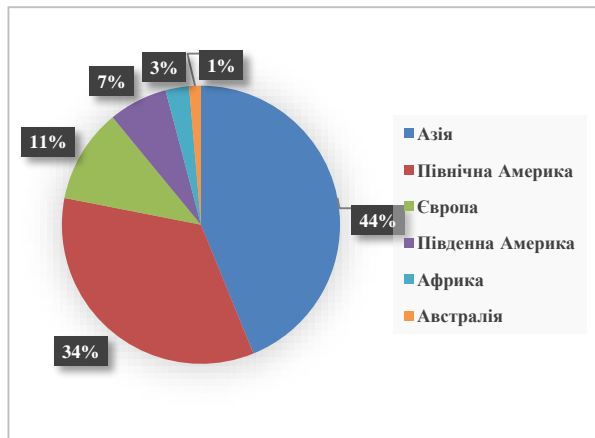


Рис. 2. Розподіл зсувів по континентах за останні 50 років

Fig. 2. Distribution of landslides by continent over the past 50 years

Із рис. 2 можна зробити висновки, що основні місця зсувів розташовані в Азії та Північній Америці, тобто на континентах із великою кількістю вулканічної та сейсмічної активності, із підвищеним обсягом річних опадів та гористим рельєфом [1, 2].

Прояви небезпечних зсувних процесів бувають у Канаді, усіх штатах США, особливо вздовж тихоокеанського узбережжя, у Скелястих горах та Аппалачах, а також вони поширені на американських острівних територіях [6].

Великі зсуви, викликані землетрусами в Азії, мають особливості, пов'язані з тим, що зони з високою сейсмічною активністю збігаються із зоною поширення лесових порід. У природних умовах лесові породи мають значну стійкість. Але в разі збільшення природної вологості несні властивості цих відкладів різко знижуються.

Згідно з оцінкою ймовірності виникнення зсувів і лавин у всьому світі [11, 13], на основі морфологічних, геологічних, метеорологічних і сейсмологічних даних визначено, що «гарячі точки» утворення зсувів розташовані в сейсмічно активних гірських масивах. Небезпеку утворення зсувів для території Азії оцінено від середньої до дуже високої.

Згідно з даними Всесвітньої організації здоров'я у, період із 1998 по 2017 роки зсуви вразили приблизно 4,8 мільйони людей і спричинили понад 18 000 смертей.

В Україні зсуви посідають панівне становище унаслідок значного поширення екзогенних геологічних процесів майже у всіх областях. Вони виникають на порівняно незначній площі, проте їх активізація має значні негативні наслідки через швидкоплинність розвитку, суттєві деформації та руйнування інженерно-господарських об'єктів.

Різноманітність інженерно-геологічних умов України обумовлена особливостями структурно-геологічної будови, зонально-кліматичними, геоморфологічними, гідрогеологічними та сейсмічними характеристиками. Разом із техногенними чинниками це визначає площі розповсюдження екзогенних геологічних процесів і явищ, а також пов'язаних із ними змін довкілля.

Небезпека значно зростає у місцях розташування об'єктів, що створюють сприятливі умови для активізації процесів та виникнення надзвичайних ситуацій техногенного походження. Це гірничодобувні та переробні підприємства, меліоративні системи, промислово-міські агломерації, автомобільні дороги, залізничні колії, нафто- та газопроводи тощо [7].

Сучасна активізація зсувів, що розвиваються на схилах різного генезису, досить часто пов'язана з проявом супутніх процесів – ерозійного та абразійного, що є чинниками підсилення основного процесу. Активізація зсувів на території населених пунктів пов'язана з активною господарською діяльністю без урахування планувальних обмежень, відсутністю належних інженерних та екологічних заходів щодо освоєння територій. Найбільшої шкоди розвиток та активізація зсувів завдає міським територіям зі щільною забудовою та значною чисельністю населення.

Так, за даними Національної доповіді про стан техногенної та природної безпеки в Україні, у 2020 році площа ділянок із розвитком зсувів у межах міських територій складає понад 44,0 км<sup>2</sup>. Зсуви мають розвиток на території 405 населених пунктів, серед яких Київ, Дніпро, Кам'янське, Одеса, Лисичанськ, Куп'янськ, Чернівці та інші [10].

За останніми даними (на 2020 рік), на території України зафіксовано 22 968 зсувів. Порівняльний графік кількості зсувів за 2019 та 2020 роки по всій території України представлено на рис. 3.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

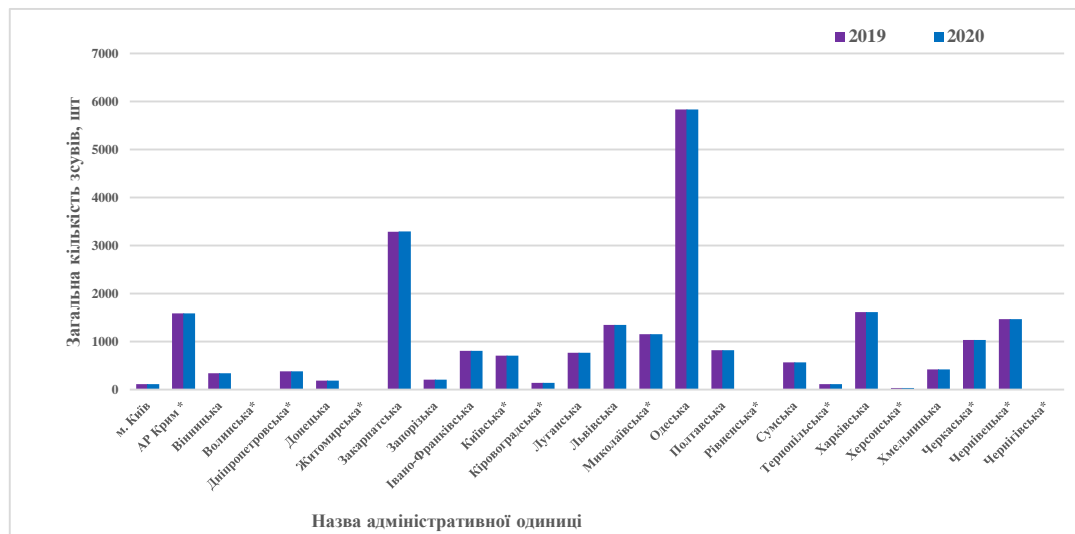


Рис. 3. Гістограма порівняння кількості зсувів за 2019 та 2020 роки за всіма адміністративними одиницями України

Fig. 3. Histogram comparing the number of landslides for 2019 and 2020 for all administrative units of Ukraine

Кількість зсувів рік у рік неухильно зростає. Поширення зсувів на території України представлено на рис. 4.

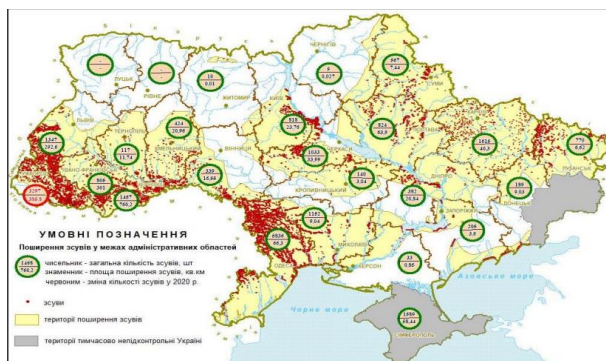


Рис. 4. Поширення зсувів на території України

Fig. 4. Distribution of landslides in Ukraine

Особливу увагу необхідно приділити проблемам зменшення ризику природно-техногенних зсувів на забудованих територіях. Ризик руйнівних (аварійних) проявів зсувів на схилах урбанізованих територій існує через неповне врахування всіх особливостей будови схилу, властивостей порід, наявності або виникнення в присхилкових масивах ослаблених поверхонь і зон, впливу на схили важкопрогнозованих стихійних процесів та явищ (землетрусів, ураганів, повеней, штормів). Значну роль у цьому відігра-

ють техногенні впливи, виходи з ладу або неправильна експлуатація систем інженерного захисту. Можливі також прорахунки, допущені під час проектування і здійснення забудови, проведення заходів із підготовки інженерного захисту та його здійснення [3, 9, 12].

Використання зсувних схилів для забудови територій у межах узбережжя Чорного й Азовського морів, долин рівнинних рік, гірських схилів Карпат і Криму обумовлює зростання ризику аварій та катастроф. Це спостерігалось у Закарпатській, Чернівецькій областях та в Автономній Республіці Крим.

Розвиток зсувів створює аварійні й катастрофічні ситуації в Чернівцях, Снятині, Косові, Верховині, а також у зонах нафто- та газопроводів Карпатського регіону. Детально вивчені умови розвитку давніх зсувів у басейні р. Кам'янка (Стрийський район Львівської області) вказують на можливість їх катастрофічної активізації з руйнуванням нафтопроводу «Дружба» та моментальним викидом у річкову систему Дністра близько трьох тисяч кубометрів нафти і, як наслідок, повним екологічним знищенням р. Дністер, яка є головним джерелом водопостачання Чернівецької та Одеської областей і Республіки Молдова. Це може призвести до екологічної катастрофи в Європі, за масштабами близької до Чорнобильської.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Рис. 3 і 4 демонструють актуальність проблеми зсувних явищ в Україні та необхідність прогресивного вивчення процесів із метою їх запобігання, постійного моніторингу за стійкістю укосів та схилів, регулювання промислової діяльності людини [4, 8].

### Наукова новизна та практична значимість

Проведено комплексне дослідження сучасних тенденцій у виникненні та розвитку зсувів на території різних країн світу та зокрема України з урахуванням останніх досягнень в галузі геології, геомеханіки та будівництва. Результати огляду тенденції зсувів можуть бути використані для поліпшення стратегій управ-

ління природними ризиками, розробки інженерних заходів для запобігання зсувам та підвищення безпеки населення й інфраструктури.

### Висновки

Загалом дослідження світових тенденцій проявів зсувів підкреслює необхідність глибокого розуміння природних та антропогенних факторів, що впливають на цей процес, для розробки ефективних стратегій управління ризиками та забезпечення стійкості геологічно активних регіонів у масштабах усього світу. Необхідно постійно здійснювати ретельне планування забудови, уникаючи будівництва в небезпечних зонах і забезпечуючи стійке управління земельними ресурсами.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барсукова С. О., Шапошник К. В. *Аналіз тенденції прояву зсувів у світі. «Наукова весна» 2023 : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених.* (Дніпро, 1–3 березня 2023). Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2023. С. 3–5.
2. Біда О. Аналіз деградації ґрунтів у світі. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Економіка АПК.* 2013. № 20 (2). С. 186–192.
3. Бойко К. Є. Геологічні умови формування сучасних зсувів південного берега Криму. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія».* 2015. Вип. 43. С. 33–38.
4. *ДБН В.1.1-12:2006 (2007). Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України [Чинний від 1970-01-01].* Київ : Мінбуд України.
5. Зсув (порушення). *Вікіпедія.*  
URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D1%81%D1%83%D0%B2\\_\(%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D1%81%D1%83%D0%B2_(%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F))
6. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 році.*  
URL: <https://mepg.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Natsionalna-Dopovid-2020-2.pdf>
7. Ковров О. С. Екологічна небезпека зсувів в національному та регіональному контексті. *Національний гірничий університет. Збірник наукових праць.* 2018. № 53. С. 278–290.
8. Причина К. *Удосконалення методу розрахунку ґрунтових схилів в умовах міської забудови при змінному рівні підземних вод* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 2016. 21 с.
9. Тютюкін О. Л., Ігнатенко Д. Ю. Визначення національних параметрів підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечних схилах. *Наука та прогрес транспорту.* 2021. № 6 (90). С. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/225281>
10. Barsukova S. O. Analysis of landslide trends in Ukraine. *Widening our horizons.* 2023. P. 37–38.
11. Cao B., Zheng X., Wang H. Formation Conditions and Risk Evaluation of Debris Flow in Tianchi Lake Area of Changbai Mountains Natural Protection Area, China (C101-5). *Landslides.* Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. P. 91–97. DOI: [https://doi.org/10.1007/s-540-28680-2\\_10](https://doi.org/10.1007/s-540-28680-2_10)
12. Landslides. *World Health Organization.* URL: [https://www.who.int/health-topics/landslides#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/landslides#tab=tab_1)
13. Nadim F., Kjestad O., Peduzzi P., Herold C., Jaedicke C. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides.* 2006. Vol. 3. P. 159–173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>

S. O. OLISHEVSKA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, +38 (050) 482 36 14, e-mail Olishevska.s.o@nmu.one, ORCID 0000-0003-0821-1091

## Overview of Landslide Trends in the World and in Ukraine

**Purpose.** The main purpose of the study is to systematize and analyse in-depth current trends in the field of landslide prevention and development in different countries of the world, especially in Ukraine, as well as to consider and highlight the main factors that cause landslides, and to study in detail the methods of their prediction and minimization of relevant risks. **Methodology.** Landslides are a serious geological hazard. Currently, there is a tendency to increase the frequency of landslides due to anthropogenic impact worldwide. The natural processes of the geological environment, together with the development of mineral deposits, massive and large-scale land development, lead to the intensification of landslide processes. The cause of landslide formation is an imbalance between the shear force of gravity and the retaining forces. **Findings.** The number of landslides in recent years has been analysed and their distribution on different continents has been considered in detail. The causes of landslides in Ukraine and other countries of the world are identified and systematized. The urgency of the problem of landslide phenomena in Ukraine is considered, and the need for progressive study of landslide formation processes in order to prevent them is emphasized. The importance of continuous monitoring of slope stability is emphasized to reduce risks and improve safety. **Originality.** A comprehensive study of current trends in the occurrence and development of landslides in different countries of the world and Ukraine in particular was carried out, taking into account the latest advances in the field of geology, geomechanics and construction. Based on the analysis, conclusions were drawn about the need for progressive study of landslide processes in order to prevent them. **Practical value.** The results of the review of landslide prevention trends can be effectively used to improve natural risk management strategies, as well as to develop new and improve existing engineering measures aimed at preventing landslides. This, in turn, will help to improve the safety of both the population and critical infrastructure.

*Keywords:* landslide; monitoring; soil; rock; tendency to prevent landslides; climate change

### REFERENCES

1. Barsukova, S. O., & Shaposhnyk, K. V. (2023). Analiz tendentsii proiavu zsuiviv u sviti. In «*Naukova vesna*» 2023 : ma-terialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh (pp. 3–5). Dnipro University of Technology. Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
2. Bida, O. (2013). Analysis of soil degradation in the world. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series «AIC Economics*, 20(2), 186-192. (in Ukrainian)
3. Boiko, K. Ye. (2015). Heolohichni umovy formuvannia suchasnykh zsuiviv pivdennoho bereha Krymu. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology»*, 43, 33-38. (in Ukrainian)
4. *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy, DBN V.1.1-12:2006 (2007)*. (1970). Kyiv: Minbud Ukrainy. (in Ukrainian)
5. Zsuv (porushennia). *Wikipedia*. Retrieved from URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D1%81%D1%83%D0%B2\\_\(%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D1%81%D1%83%D0%B2_(%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F)) (in Ukrainian)
6. *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2020 rotsi*. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Natsionalna-Dopovid-2020-2.pdf>
7. Kovrov, O. S. (2018). Ecological hazard of landslides in national and regional contexts. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 53, 278-290. (in Ukrainian)
8. Prychyna, K. S. (2016). *Udoskonalennia metodu rozrakhunku hruntovykh skhyliv v umovakh miskoi zabudovy pry zminnomu rivni pidzemnykh vod* (Extended abstract of PhD dissertation). Dnipropetrovsk. (in Ukrainian)
9. Tiutkin, O. L., & Ihnatenko, D. Y. (2021). Determination of rational parameters of supporting structures made of soil-cement piles on landslide-prone slopes. *Science and Transport Progress*, 6(90), 97-105. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/225281> (in Ukrainian)
10. Barsukova, S. O. (2023). Analysis of landslide trends in Ukraine. *Widening our horizons*, 37-38. (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

---

11. Cao, B., Zheng, X., & Wang, H. (n.d.). Formation Conditions and Risk Evaluation of Debris Flow in Tianchi Lake Area of Changbai Mountains Natural Protection Area, China (C101-5) (pp. 91-97). In *Landslides*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [https://doi.org/10.1007/3-540-28680-2\\_10](https://doi.org/10.1007/3-540-28680-2_10) (in English)
12. Landslides. *World Health Organization*. Retrieved from [https://www.who.int/health-topics/landslides#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/landslides#tab=tab_1) (in English)
13. Nadim, F., Kjestad, O., Peduzzi, P., Herold, C., & Jaedicke, C. (2006). Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3, 159-173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>

Надійшла до редколегії: 21.02.2024

Прийнята до друку: 20.06.2024

## ЗМІСТ

### **АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ**

**В. В. МАЛОВІЧКО, Н. В. МАЛОВІЧКО,  
Р. В. РИБАЛКА**

Створення математичної моделі станційного рейкового кола у вигляді скінченного дискретного автомата ..... 5

### **ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**

**М. М. БІЛЯЄВ, І. В. КАЛАШНІКОВ, О. В. БЕРЛОВ,  
В. А. КОЗАЧИНА, В. М. ПОЛТОРАЦЬКА**

Використання габіонів для захисту від ураження нафтосховища ..... 12

**М. М. БІЛЯЄВ, В. В. КОЗАЧИНА**

Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах ..... 18

**М. М. БІЛЯЄВ, В. Д. ПЕТРЕНКО, В. В. БІЛЯЄВА,  
О. В. БЕРЛОВ, О. В. ЗВОНАРЬОВА**

Математичне моделювання процесу формування кислотних дощів у разі викидів із ТЕС ..... 26

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**Я. Д. ОСТАПЕЦЬ**

Експериментальна оцінка ефективності використання візуальних міток для керування безпілотними транспортними засобами ..... 34

### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО, К. АСТАРОВ,  
Б. В. ЛИТВИНОВ, А. ОРАК, Н. УМУР**

Вплив температури ізотермічного перетворення на структуру і властивості низьковуглецевої сталі ..... 43

### **РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**А. Я. КУЗИШИН, В. В. КОВАЛЬЧУК**

Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу ..... 53

**Є. С. РЯБОВ, Б. Х. ЄРІЦЯН, І. М. КОЛОДІЙ,  
С. В. ІВАНОВ, О. А. СИЧ, А. В. ГАЛИЧ**

Підвищення паливної ефективності магістрального тепловоза з роздільним навантаженням секцій ..... 64

### **ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**

**Л. І. КЛОЧКО**

Несні сталеві конструкції для встановлення залізничних тензометричних ваг ..... 80

**Є. А. МІСЮРА**

Визначення ефективності сталевих конструкцій покриття складської будівлі ..... 90

**С. О. ОЛШЕВСЬКА**

Огляд тенденцій виникнення зсувів у світі та в Україні ..... 100

# CONTENTS

## ***AUTOMATED AND TELEMATIC SYSTEMS ON TRANSPORT***

**V. V. MALOVICHKO, N. V. MALOVICHKO,  
R. V. RYBALKA**

Creation of a Mathematical Model of a Stationary Rail Circuit  
in the Form of a Finite Discrete Automaton ..... 5

## ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

**M. M. BILIAIEV, I. V. KALASHNIKOV,  
O. V. BERLOV, V. A. KOZACHYNA,  
V. M. POLTORATSKA**

Using Gabions to Protect Oil Storage Facilities  
from Damage ..... 12

**M. M. BILIAIEV, V. V. KOZACHYNA**

Modeling of Non-Stationary Mass Transfer Process  
in Groundwater ..... 18

**M. M. BILIAIEV, V. D. PETRENKO, V. V. BILIAIEVA,  
O. V. BERLOV, O. V. ZVONAROVA**

Mathematical Modeling of the Process of Acid Rain  
Formation in Case of Emissions from Thermal  
Power Plants ..... 26

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING***

**Y. D. OSTAPETS**

Experimental Evaluation of The Effectiveness of Using Visual  
Cues for Controlling Unmanned Vehicles ..... 34

## ***MATERIAL SCIENCE***

**I. O. VAKULENKO, S. O. PLITCHENKO,  
K. ASGAROV, B. V. LYTVYNOV, A. ORAK, H. UMUR**

Influence of the Isothermal Transformation Temperature on  
the Structure and Properties of Low-Carbon Steel ..... 43

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**A. Ya. KUZYSHYN, V. V. KOVALCHUK**

Experimental Study of the Regularities of Deformation  
of the Rubber Cord Shell of a Pneumatic Spring  
of High-Speed Rolling Stock ..... 53

**Ye. S. RIABOV, B. Kh. YERITSIAN, I. M. KOLODIL,  
S. V. IVANOV, O.A. SYCH, A. V. HALYCH**

Increasing the Fuel Efficiency of a Mainline Diesel  
Locomotive with Separate Section Loading ..... 64

## ***TRANSPORT CONSTRUCTION***

**L. I. KLOCHKO**

Bearing Steel Structures for Installation of Railway Strain  
Gauge Scales ..... 80

**Ye. A. MISIURA**

Determination of the Efficiency of Steel Structures  
of a Warehouse Building Roof ..... 91

**S. O. OLISHEVSKA**

Overview of Landslide Trends in the World  
and in Ukraine ..... 100

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### **Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### **Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:**

1) файл зі статтю та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

### **Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:**

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### **З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Наукова бібліотека (ауд. 166),  
Український державний університет науки і технологій,  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,  
49010  
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.**

№ 2 (106) 2024

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова  
Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова  
Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 12,79. Тираж 100 пр. Зам. №02/02

**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. 2 (106) 2024

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova  
Desktop publishing – O. V. Pominova  
Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 12,79. Circulation 100. Order no. 02/02

**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

