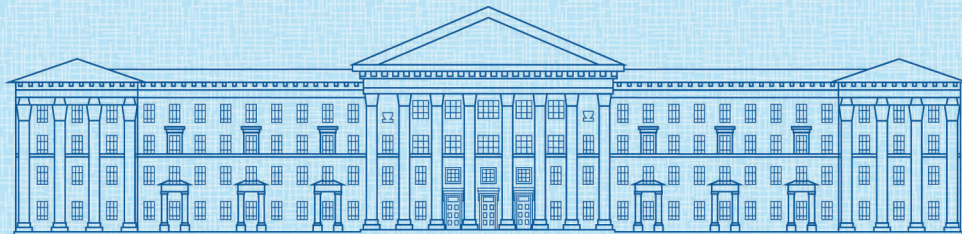




ISSN 2307-3489 (Print)  
ISSN 2307-6666 (Online)



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 3(107)

---

•• 2024 ••

Український державний університет науки і технологій

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 3 (107) 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); Вакулєнко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головка 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 25.09.2024 р., протокол № 2

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;  
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. 3 (107) 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 Puluž 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 25.09.2024, Protocol no. 2

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

Address  
of Founder

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

Edition is being published since 1936:

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

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

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

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

since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

# ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 556.3:624.131.6-047.58

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 процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах

**Мета.** Важливим інструментом розв'язання складних задач, які полягають в аналізі динаміки підземних вод і процесів тепломасопереносу в них під час дослідження їх забруднення від різних техногенних джерел у разі аварійних розливів хімічно небезпечних речовин тощо, є метод математичного моделювання. Основною метою статті є розробка комплексу математичних моделей для розрахунку процесу фільтрації безнапірних підземних вод, масопереносу домішки та процесу теплопереносу в підземних водах. **Методика.** Для прогнозування динаміки підземних вод використано двовимірне рівняння фільтрації у формі Буссінеска. Для моделювання процесів масопереносу в підземних водах використано двовимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Процес заморожування окремих ділянок підземного потоку змодельовано за допомогою рівняння Лапласа для потенціалу швидкості (розрахунок поля швидкості потоку в умовах геометрії, що змінюється з часом) та двовимірного рівняння теплопереносу в підземних водах. Для розв'язання моделювальних рівнянь динаміки підземних вод і тепломасопереносу використано скінченнорізницевої схеми. **Результати.** Побудовано комплекс математичних моделей для розрахунку процесу фільтрації безнапірних ґрунтових вод та їх хімічного забруднення. Проведений експеримент підтвердив адекватність побудованої чисельної моделі фільтрації безнапірного потоку підземних вод. Побудовано ефективну математичну модель, що дозволяє визначати температурні поля в підземних водах під час роботи свердловини, яку використовують для заморожування окремих ділянок потоку. Результати комп'ютерного моделювання свідчать про ефективність розроблених математичних моделей. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективні математичні моделі для прогнозування рівня хімічного забруднення підземних вод, її динаміки та теплового режиму. Побудовані математичні моделі дають можливість визначати динаміку зміни температурного режиму підземних вод під час роботи свердловин, через які подають холодоагент для заморожування окремих ділянок. Розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє здійснювати комплексне оцінювання стану підземних вод. **Практична значимість.** Розроблено комплекс комп'ютерних програм для проведення обчислювального експерименту з дослідження процесів фільтрації, хімічного забруднення підземних вод та процесів теплопереносу в них. Цей комплекс програм можна використати для наукового обґрунтування інженерних рішень, спрямованих на захист підземних вод.

**Ключові слова:** динаміка підземних вод; масоперенос у ґрунтових водах; заморожування підземних вод; теплоперенос; математичне моделювання

### Вступ

У багатьох країнах світу проблема підтоплення територій стоїть дуже гостро. Таке підтоплення має суттєві негативні наслідки: підземна вода потрапляє в підвали, фундаменти будівель,

неможливо здійснювати сільгоспроботи, має місце зниження родючості земель [3, 6, 7].

Крім цього, зниження рівня підземних вод є необхідним під час будівництва ряду споруд [1]. Тому цій проблемі приділяють значну увагу.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

У наш час використовують різні методи зниження рівня підземних вод. Часто для вирішення цієї проблеми використовують свердловини [1]. Також широко застосовують метод заморожування ділянки підземних вод із подальшим відкачуванням води з цієї ділянки.



Рис. 1. Спеціальне обладнання для подачі холодоагента в підземні води (<https://www.geofrost.no/en/>)

Fig. 1. Special equipment for refrigerant supply to groundwater (<https://www.geofrost.no/en/>)

Для цього використовують спеціальне обладнання (рис. 1) та свердловини, що забезпечують постійний режим подачі холодоагента в потік, де здійснюється охолодження (рис. 2) [5, 10, 14].

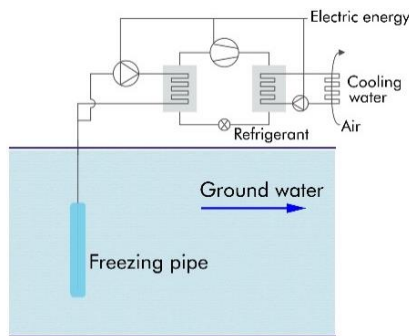


Рис. 2. Свердловини з холодоагентом у підземному потоці (<https://www.geofrost.no/en/>)

Fig. 2. Wells with refrigerant in the underground flow (<https://www.geofrost.no/en/>)

Лід, що утворюється в підземному потоці, створює завісу, яка працює як «затвор» на окремій ділянці (рис. 3). Це дозволяє на цій ділянці потоку здійснювати відкачування підземних вод (рис. 4).

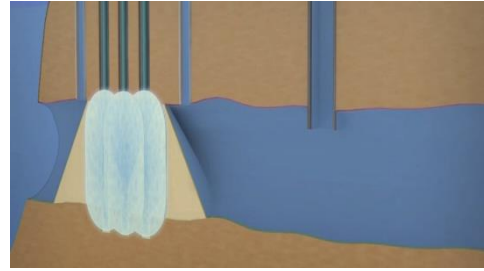


Рис. 3. Льодова «завіса» в підземному потоці (<https://www.geofrost.no/en/>)

Fig. 3. Ice «curtain» in an underground stream (<https://www.geofrost.no/en/>)

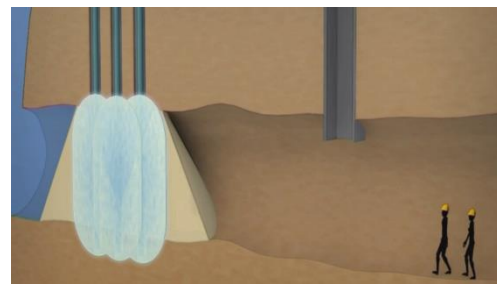


Рис. 4. Створення «сухої» зони в підземному потоці (<https://www.geofrost.no/en/>)

Fig. 4. Creating a «dry» zone in an underground stream (<https://www.geofrost.no/en/>)

Особливо важливою проблемою в цій галузі є створення розрахункових методів для аналізу ефективності використання різних інженерних технологій зниження рівня підземних вод.

Найбільш широко використовують емпіричні та аналітичні методи розрахунку для задач цього класу, що дають можливість прогнозувати процеси геоміграції, теплопереносу та динаміки підземних вод під час роботи дренажних систем тощо [1, 4, 11, 12]. Але використання таких методів дозволяє отримати інформацію лише для «спрощених» сценаріїв. Високі вимоги щодо прогнозних даних потребують створення більш удосконалених математичних моделей для розв'язування складних задач у галузі динаміки підземних вод та процесів тепломасопереносу в них. Альтернативою є використання чисельних моделей [2, 8, 9, 13]. Але проблема розробки швидкорозрахункових чисельних моделей для аналізу складних процесів динаміки підземних вод та процесів тепломасопереносу в них залишається актуальною.

### Мета

Автори ставлять за основну мету цієї роботи створення комплексу математичних моделей для розрахунку фільтрації ґрунтових вод та процесів тепломасопереносу в аспекті розв'язання інженерних задач захисту підземних вод.

### Методика

Для розрахунку динаміки ґрунтових вод та процесів тепломасопереносу в них використовують фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища.

*Моделювання процесу фільтрації.* Для опису руху безнапірного потоку підземних вод використовуємо рівняння Буссінеска:

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

де  $h$  – глибина безнапірного підземного потоку;  $k$  – коефіцієнт фільтрації водоносного шару;  $\mu$  – недостача насичення (водовіддача);  $h_m$  – середня глибина підземного потоку.

У разі використання рівняння (1) водотривкість вважають горизонтальною.

Компоненти вектора швидкості підземного потоку розраховуємо на базі закону Дарсі:

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

Крайові умови для моделювального рівняння (1) розглянуто в [3].

Слід відзначити, що для реальних задач динаміки підземних вод знайти розв'язок рівняння фільтрації (1) можна лише шляхом використання чисельних методів. Чисельне розв'язання цього рівняння розглянуто нижче.

*Моделювання процесу геоміграції.* Значна кількість задач у галузі динаміки підземних вод пов'язана з аналізом руху домішки в цих водах. Домішки можуть потрапляти в підземний потік під час фільтрації забруднених вод із відстійників-накопичувачів, під час аварійних розливів тощо. Тому часто постає проблема визначення розмірів та інтенсивності зон забруднення в підземних водах, що формуються з часом. Для дослідження процесів руху домішки в підземних водах використовуємо усереднене за глибиною потоку рівняння масопереносу [2]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (3)$$

де  $u, v$  – компоненти швидкості потоку ґрунтових вод;  $S$  – концентрація домішки в підземному потоці;  $Q$  – інтенсивність емісії домішки в підземний потік;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти дисперсії;  $t$  – час.

Положення джерела емісії (ставка-відстійника) 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 [2].

*Моделювання процесу теплопереносу в підземних водах.* Для моделювання процесу заморожування підземних вод та розрахунку динаміки зміни їх температури використовуємо таке рівняння теплопереносу:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (4)$$

де  $u, v$  – компоненти швидкості потоку ґрунтових вод;  $T$  – температура в потоці;  $a_x, a_y$  – коефіцієнти теплопровідності;  $t$  – час.

Для моделювання гідродинаміки підземного потоку в задачах про його заморожування пропонуємо використати рівняння потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

де  $P$  – потенціал швидкості.

Якщо визначено поле потенціалу швидкості, то компоненти вектора швидкості потоку визначаємо так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (6)$$

Розв'язок рівняння (5) та визначення компонент вектора швидкості підземного потоку на базі залежностей (6) дають можливість визначати швидкість потоку підземних вод під час

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

формування зони охолодження (льоду) біля свердловин, що використовують спеціальний розчин для охолодження води.

*Чисельні моделі.* Для чисельного інтегрування розглянутих моделювальних рівнянь використовуємо прямокутну різницеву сітку.

Під час побудови чисельних моделей їх параметри на різницевій сітці визначаємо таким чином:

1) глибину підземного потоку визначаємо в центрах різницевої комірки;

2) концентрацію домішки визначаємо в центрах прямокутних різницевої комірки;

3) компоненти швидкості фільтраційного потоку визначаємо на сторонах різницевої комірки;

4) температуру водного потоку визначаємо в центрах прямокутних різницевої комірки.

Формування вигляду розрахункової області здійснюємо за допомогою маркерів. Маркери визначають положення свердловин, річок (зона розвантаження підземного потоку), сховищ із рідинними відходами тощо.

Для побудови чисельної моделі фільтраційного потоку рівняння (1) зводимо до вигляду:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left( \frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right); \quad (7)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = W. \quad (8)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (7) використовуємо різницеву схему сумарної апроксимації:

– перший крок розщеплення:

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

– другий крок розщеплення:

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

$$\text{де } a = \frac{kh_m}{\mu}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння геоміграції (3) здійснюємо його розщеплення таким чином [1]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right); \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i)(y - y_i). \quad (11)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (9) застосуємо двокрокову схему розщеплення [2]:

– на першому кроці:

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

– на другому кроці:

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

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння (10) застосуємо таку двокрокову схему розщеплення [2]:

– на першому кроці:

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– на другому кроці:

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

$$\text{де } v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Для чисельного інтегрування рівняння (11) використовуємо метод Ейлера.

Слід зазначити, що розв'язання задачі заморожування потоку належить до особливо складних задач динаміки підземних вод. Це пов'язано з тим, що потрібно здійснювати пошук рішення (поле температури, швидкості підземного потоку) в області, вигляд якої змінюється з часом, що обумовлено появою зони заморожування – тобто зони, де немає руху рідини. Таким чином, у потоці з'являється зона, що є непроникливою та змінює свій розмір і форму з часом.

Під час розв'язання задач, пов'язаних із процесом заморожування потоку підземних вод, на першому етапі здійснюємо чисельне інтегрування рівняння Лапласа за явною формулою. Для цього виконуємо таку апроксимацію похідних:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2};$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2},$$

де  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – крок різничевої сітки в напрямку осей  $Ox$ ,  $Oy$  відповідно.

З урахуванням цих апроксимацій рівняння Лапласа можна записати так:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

Значення потенціалу швидкості визначаємо таким чином:

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

$$\text{де } Z = \left( \frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right).$$

Розщеплення рівняння (4) має вигляд [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial v T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (13)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (12) застосовуємо двокрокову схему розщеплення [2]:

– на першому кроці:

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

– на другому кроці:

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

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння (13) застосовуємо таку двокрокову схему розщеплення [2]:

– на першому кроці:

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

– на другому кроці:

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

$$\text{де } v^+ = \frac{v + |v|}{2}; v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Алгоритм розв'язання задач цього класу такий:

1. Формуємо вигляд розрахункової області.
2. Вводиться інформація про фізичні параметри задачі.
3. Задаємо положення свердловин, які використовують для заморожування підземного потоку.
4. Розв'язуємо рівняння Лапласа для потенціалу швидкості.
5. Визначаємо компоненти вектора швидкості потоку.
6. Здійснюємо розрахунок поля температури в потоці.
7. Визначаємо область, де температура потоку дорівнює 0, тобто відбулось заморожування води.

Поява льоду в потоці змінює геометрію розрахункової області, оскільки в зоні, де є лід, уже відсутній рух води. Тому потрібно нову розв'язати задачу динаміки підземних вод та знову визначити поле швидкості підземного потоку, а далі розв'язати задачу теплопереносу. Тобто процес повторюють, починаючи з п. 4.

На базі розроблених чисельних моделей створено комп'ютерний код WaTGE–2. Мовою програмування є FORTRAN. До складу комп'ютерного коду входять:

- 1) Wa.DAT – файл початкових даних (уведення інформації про розмір розрахункової області, положення джерела забруднення, концентрацію домішки в підземному потоці, положення свердловин тощо);
- 2) Wa1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку динаміки зміни глибини ґрунтових вод із часом;
- 3) Wa2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку компонент швидкості фільтраційного потоку;

4) Wa3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку зміни концентрації домішки в ґрунтових водах із часом;

5) WaT3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку зміни концентрації температури в ґрунтових водах із часом;

6) WaTV2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку компонент швидкості потоку, які використовують під час розв'язання задачі теплопереносу;

7) WaTR2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розв'язання рівняння потенціалу швидкості.

## Результати

На першому етапі досліджень було проведено експеримент в лабораторії кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» Українського державного університету науки і технологій. Мета експерименту – верифікація чисельної моделі фільтрації, що розглянута вище.

Експеримент проведено у фільтраційному лотку: 30×10×15 см (рис. 5). В аванкамері лотка підтримували постійний рівень води  $h_1 = 13,5$  см (початковий переріз). Рівень води в кінцевому перерізі  $h_2 = 3,4$  см. Розглянуто фільтрацію в разі горизонтальної водотривкості. Під час проведення експерименту вимірювали витрату води крізь область фільтрації  $Q$  об'ємним способом та здійснювали відеозапис із метою фіксування положення фронту фільтрації  $l(x)$  з часом.

На рис. 5 показано область фільтрації за стаціонарного режиму.

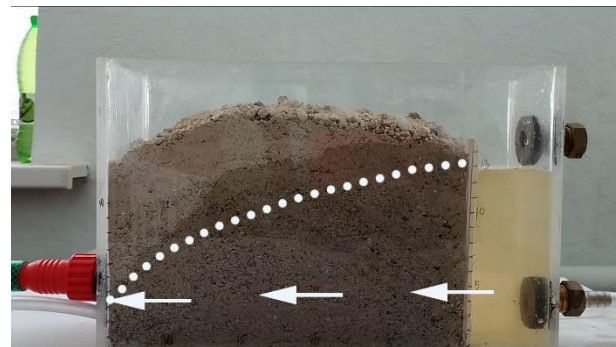


Рис. 5. Фільтраційний лоток

Fig. 5. Filtering tray

Як можна бачити з рис. 5, зона промочування чітко визначає область фільтрації потоку. Крапками показано криву депресії. Перевищення

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

зони змочування вище кривої депресії обумовлено роботою капілярних сил.

Для обробки результатів експерименту використано формулу Дюпюї:

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_{1-2}}, \quad (14)$$

де  $q = \frac{Q}{b}$  – питома витрата води;  $b$  – ширина лотка;

$k$  – коефіцієнт фільтрації;  $h_1, h_2$  – глибина фільтраційного потоку в різних перерізах, довжина між якими дорівнює  $l_{1-2}$ .

Використовуючи формулу (11), можна визначити коефіцієнт фільтрації для заміряних глибин фільтраційного потоку та витрати.

У табл. 1 наведено результати обчислювального експерименту та їх порівняння з даними експерименту.

Таблиця 1

## Глибина фільтраційного потоку

Table 1

Depth of filtration flow		
Переріз	Глибина потоку, см (експеримент)	Глибина потоку, см (розрахунок)
5 см	12,2	11,8
10 см	11,1	10,6
15 см	9,1	8,7
20 см	6,8	6,2

Як можна бачити з табл. 1, є задовільне узгодження даних експерименту та розрахунку.

На наступному етапі досліджень було проведено обчислювальний експеримент із метою перевірки стійкості розрахунку розроблених чисельних моделей для моделювання процесу заморожування підземних вод. Розглянуто свердловину (рис. 6, маркер 4), де підтримували постійну температуру  $0^\circ\text{C}$ . Температура навколишнього середовища  $20^\circ\text{C}$ . Потрібно було визначити динаміку зміни температури в потоці з часом та форму зони заморожування. Узято, що в тій різницевій комірці, де температура стала рівною  $0^\circ\text{C}$ , формувався лід і ця зона перетавала бути зоною течії.

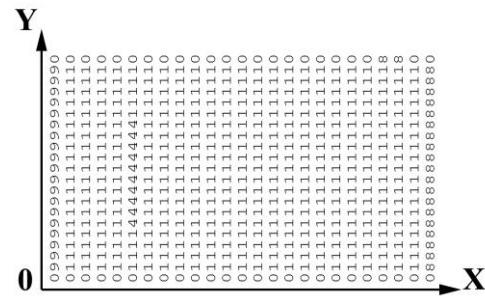


Рис. 6. Схема розрахункової області:  
4 – позиція свердловини, що подає реагент для заморожування

Fig. 6. Scheme of the computational domain:  
4 – position of the well supplying the freezing agent

На рис. 8 і 10 показано температурні поля й динаміку їх зміни з часом у разі роботи свердловини. Час на цих рисунках є безрозмірним. На рис. 7 і 9 показано зміну форми зони заморожування в потоці.

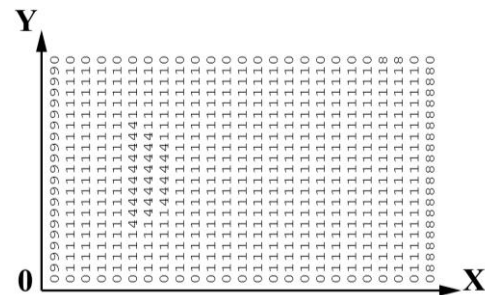


Рис. 7. Область заморожування для моменту часу  $t = 5$ ; маркер 4 – положення льоду

Fig. 7. Freezing area for time  $t = 5$ ;  
marker 4 – ice position

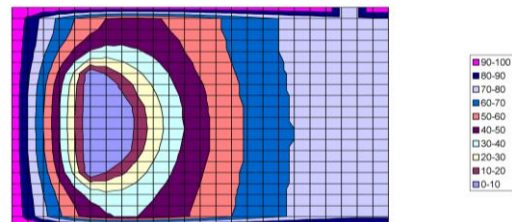


Рис. 8. Поле температури в потоці для моменту часу  $t = 5$

Fig. 8. Temperature field in the flow for time  $t = 5$



6. Щербак О. В., Яковлев С. О., Долін В. В. Моделирование гидрогеофильтрационного поля грунтовых 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>
7. 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>
8. 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>
9. 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>
10. Hong Z., Shi R., Yue F., Yang J., Wu Y. Mathematical Solution of Temperature Field in Non-Hollow Frozen Soil Cylinder Formed by Annular Layout of Freezing Pipes. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. P. 1–15.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/math11081962>
11. Mustafa S., Bahar A., Aziz Z. A., Darwish M. Analytical solutions of contaminant transport in homogeneous and isotropic aquifer in three-dimensional groundwater flow. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Iss. 58. P. 87114–87131. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21402-8>
12. Shaikh B. Y., Eldho T. I. Analytical modeling of contaminant transport along sloping coastal beaches in presence of tidal waves and exponential rainfall infiltration. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023. Vol. 256, Article 104194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104194>
13. Shakeri R., Nassery H. R., Ebadi T. Numerical modeling of groundwater flow and nitrate transport using MODFLOW and MT3DMS in the Karaj alluvial aquifer, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 195, Article 242. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10881-4>
14. Zhou, M.-M., Marwan A., Meschke G. Modeling and optimization of ground freezing in tunneling. *ITA World Tunnel Congress 2015*. 2015. P. 1–12.

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 Filtration and Heat and Mass Transfer Processes in Groundwater

**Purpose.** The method of mathematical modeling is an important tool for solving complex problems involving the analysis of groundwater dynamics and heat and mass transfer processes in them when studying their contamination from various anthropogenic sources in the event of accidental spills of chemically hazardous substances, etc. The main purpose of the article is to develop a set of mathematical models for calculating the process of filtration of non-pressure groundwater, mass transfer of impurities and the process of heat transfer in groundwater. **Methodology.** The two-dimensional Boussinesq equation of filtration was used to predict the dynamics of groundwater. The two-dimensional equation of convective-diffusive transport of impurities was used to model the processes of mass transfer in groundwater. The process of freezing of individual sections of the groundwater flow is modeled using the Laplace equation for the velocity potential (calculation of the flow velocity field in a time-varying geometry) and the two-dimensional equation of heat transfer in groundwater. Finite difference schemes were used to solve the modeling equations of groundwater dynamics and heat and mass transfer. **Findings.** A set of mathematical models has been developed to calculate the process of filtration of non-pressure groundwater and its chemical contamination. The experiment has confirmed the adequacy of the constructed numerical model of filtration of a non-pressure groundwater flow. An effective mathematical model was developed that allows determining the temperature fields in groundwater during the operation of a well used to freeze certain sections of the flow. The results of computer modeling indicate the effectiveness of the developed mathematical models. **Originality.** Effective mathematical models for predicting the level of chemical contamination of groundwater, its dynamics and thermal regime are proposed. The constructed mathematical models make it possible to determine the dynamics of changes in the temperature regime of groundwater during the operation of wells through which refrigerant is supplied to freeze individual areas. A computer program has been developed that allows for a comprehensive assessment of groundwater conditions. **Practical value.** A set of

computer programs has been developed to conduct a computational experiment to study the processes of filtration, chemical contamination of groundwater and heat transfer processes in them. This set of programs can be used for the scientific substantiation of engineering solutions aimed at protecting groundwater.

*Keywords:* groundwater dynamics; mass transfer in groundwater; groundwater freezing; heat transfer; mathematical modeling

## REFERENCES

1. *Nastanova shchodo inzhenernoho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia, 135 DSTU-N B V.1.1-38:2016.* (2016). (in Ukrainian)
2. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostra-neniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede.* Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
3. Kremez, V. S., Buts, Y. V., & Tsymbal, 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)
4. Rudakov, D. V. (2012). *Matematychni metody v okhoroni pidzemnykh vod.* Dnipropetrovsk: National Mining University. (in Ukrainian)
5. Tiutkin, O. L., & Miroshnyk, V. A. (2020). Comparative analysis of special methods during vertical works. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, 17*, 81-90. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205019> (in Ukrainian)
6. 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)
7. 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)
8. 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)
9. 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)
10. Hong, Z., Shi, R., Yue, F., Yang, J., & Wu, Y. (2023). Mathematical Solution of Temperature Field in Non-Hollow Frozen Soil Cylinder Formed by Annular Layout of Freezing Pipes. *Mathematics, 11*(8), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11081962> (in English)
11. Mustafa, S., Bahar, A., Aziz, Z. A., & Darwish, M. (2022). Analytical solutions of contaminant transport in homogeneous and isotropic aquifer in three-dimensional groundwater flow. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(58), 87114-87131. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21402-8> (in English)
12. Shaikh, B. Y., & Eldho, T. I. (2023). Analytical modeling of contaminant transport along sloping coastal beaches in presence of tidal waves and exponential rainfall infiltration. *Journal of Contaminant Hydrology, 256*, 104194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104194> (in English)
13. Shakeri, R., Nassery, H. R., & Ebadi, T. (2022). Numerical modeling of groundwater flow and nitrate transport using MODFLOW and MT3DMS in the Karaj alluvial aquifer, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment, 195*(242). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10881-4> (in English)
14. Zhou, M.-M., Marwan, A., & Meschke, G. (2015). Modeling and optimization of ground freezing in tunneling. *ITA World Tunnel Congress, 2015*, 1-12. (in English)

Надійшла до редколегії: 15.03.2024

Прийнята до друку: 17.09.2024

**УДК 656.2.013: [504.6:519.87]**В. В. БІЛЯЄВА<sup>1</sup>, І. В. КАЛАШНІКОВ<sup>2</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>3\*</sup>, О. І. ГУБІН<sup>4</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 374 82 89, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>2</sup>Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», акціонерного товариства «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. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9434-2367

<sup>5</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

**Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації на залізничній станції**

**Мета.** Розглянуто задачу визначення розмірів зон ураження у випадку екстремальної ситуації на залізничній станції внаслідок пожежі цистерн. Задачею прогнозування є визначення зон теплового забруднення, а також хімічного та механічного забруднення. **Основна мета** роботи полягає у створенні чисельних моделей для розрахунку зон механічного та теплового забруднення довкілля в разі пожежі на залізничній станції. **Методика.** Для аналізу розмірів та інтенсивності зон теплового, хімічного, механічного забруднення довкілля у випадку виникнення екстремальної ситуації на залізничній станції використано рівняння тепломасопереносу та другий закон Ньютона для моделювання механічного забруднення довкілля. Для розв'язання рівнянь використано чисельні методи – метод Ейлера та скінченнорізницевої схеми. На базі розроблених чисельних моделей створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту. **Результати.** Розроблено сучасні комп'ютерні моделі оцінювання зон хімічного, теплового, механічного забруднення в разі виникнення екстремальної ситуації. Наведено результати комп'ютерного моделювання. **Наукова новизна.** Створено комплекс чисельних моделей для комп'ютерного моделювання процесів тепломасопереносу та динаміки руху точки, що дозволяє проводити обчислювальний експеримент із визначення зон забруднення під час пожежі на залізничній станції. **Практична значимість.** На базі створених математичних моделей розроблено комп'ютерний код. Цей код є інструментом розв'язання важливих задач у галузі екологічної безпеки та цивільного захисту. Комп'ютерний код дає можливість оперативно визначати інтенсивність та розміри зон забруднення довкілля у випадку виникнення екстремальної ситуації.

*Ключові слова:* хімічне забруднення; теплове забруднення; розлітання уламків; чисельне моделювання

**Вступ**

Прогнозування ризику ураження людини в разі екстремальних ситуацій на промислових об'єктах транспорту має важливе значення, особливо коли такі об'єкти розташовані в селітебних зонах [1, 4, 7, 10]. Екстремальні ситуації можуть призвести до хімічного, теплового і механічного забруднення навколишнього середовища та як наслідок – до токсичного, теплового ураження людини, а також ураження від метальної дії уламків. Тому вкрай важливо для кожного об'єкта енергетики, що розташований

у селітебній зоні, визначати зони ураження та створювати карту зон небезпеки в містах, де розміщена велика кількість об'єктів енергетики.

Визначення зон забруднення у разі екстремальної ситуації на залізничній станції належить до вкрай важливих задач у галузі екологічної безпеки та цивільного захисту. Такий аналіз базується на використанні математичних моделей, серед яких найбільш поширені модель Гауса або аналітичні моделі, що реалізовані вигляді спеціальних комп'ютерних кодів, наприклад «ALONA», «PHAST» [6, 8], CFD моделі [1, 5, 9].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

До недавнього часу, зокрема в підрозділок МНС, використовували емпіричні моделі під час розробці ПЛАСу (план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій), але підвищені вимоги до якості прогнозованої інформації суттєво знизили інтерес до емпіричних моделей. Розробка багатофакторних моделей, орієнтованих на розв'язання повсякденних задач, так званих «operational models», триває та є сучасним трендом у галузі екологічної безпеки й охорони праці.

**Мета**

Робота спрямована на оцінювання зон забруднення в разі ймовірної ситуації – пожежі на залізничній станції – за допомогою розроблених чисельних моделей та створеного на їх базі пакета програм.

**Методика**

Залізничні станції є об'єктами, де можливі екстремальні ситуації – займання цистерн із нафтопродуктами. Розглядаємо таку ймовірну екстремальну ситуацію на залізничній станції в Дніпропетровській області. Поруч зі станцією селітебна зона (рис. 1), тому вкрай важливо оцінити зону ураження у випадку ймовірної пожежі.

У цій роботі оцінимо зони ризику для таких видів ураження людини:

- 1) хімічне ураження (уражальний фактор – концентрація хімічно небезпечної речовини);
- 2) теплове ураження (уражальний фактор підвищена температура повітря);
- 3) механічне ураження (уражальний фактор – метальна дія уламків).

*Модель хімічного забруднення атмосферного повітря.* Для оцінювання ризику хімічного ураження використовуємо рівняння перенесення [1, 5]:

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

де  $S$  – середнє (за висотою перенесення) значення концентрації хімічно небезпечної речовини;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості

вітру в проєкції на осі координат  $x, y$ , відповідно;  $x_i, y_i$  – декартові координати  $i$ -ого джерела викиду хімічно небезпечної речовини на об'єкті;  $t$  – час;  $c; \mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;  $\delta(x_i, y_i)$  – дельта функція Дірака, за допомогою якої в моделі задають місце аварійного викиду. Інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини дорівнює  $Q$ .

Граничні умови для рівняння (1) наведені в [2].

*Модель термічного забруднення атмосферного повітря.* Для оцінювання ризику термічного ураження використовують рівняння енергії в наближенні Бусінеска [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{ grad } T), \quad (2)$$

де  $T$  – температура атмосферного повітря;  $a = (a_x, a_y)$  – коефіцієнти теплопровідності;  $x, y$  – декартові координати місця пожежі;  $t$  – час.

У випадку тривимірного процесу рівняння енергії має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \text{div}(a \text{ grad } T).$$

Граничні умови для рівняння енергії наведені в [1].

*Модель механічного забруднення атмосферного повітря.* Для прогнозування механічного ураження людини в разі розлітання уламків, що утворюються на місці вибуху, використовуємо такі рівняння руху матеріальної точки:

$$m \frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_a u^2}{2} \cdot S; \quad (3)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_a v^2}{2} \cdot S - mg, \quad (4)$$

де  $m$  – маса уламка;  $u, v$  – проєкції вектора швидкості руху уламка на осі координат;  $\rho_a$  – щільність повітря;  $C_x$  – коефіцієнт опору уламка;  $S$  – площа мідельового перерізу уламка;  $V$  – вектор швидкості руху уламка.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Початкова умова для рівнянь (3), (4) така: задаємо початкову швидкість уламка та ухил його «вильоту» від місця аварії.

У рівняннях (3) і (4) вісь  $Y$  направлена вертикально вгору, а вісь  $X$  – у напрямку горизонтального руху уламка.

*Чисельні моделі.* Для чисельного інтегрування рівняння перенесення (1) здійснюємо його розщеплення таким чином [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial S}{\partial t} &= \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i). \end{aligned}$$

Для чисельного інтегрування системи (5) використовуємо неявні різницеві схеми [2].

Для розв'язку рівняння енергії здійснюємо його розщеплення таким чином:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (7)$$

Далі здійснюємо такі перетворення [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uT}{\partial x} &= \frac{\partial u^+T}{\partial x} + \frac{\partial u^-T}{\partial x}; \\ \frac{\partial vT}{\partial y} &= \frac{\partial v^+T}{\partial y} + \frac{\partial v^-T}{\partial y}; \\ u^+ &= \frac{u+|u|}{2}, u^- = \frac{u-|u|}{2}; \\ v^+ &= \frac{v+|v|}{2}, v^- = \frac{v-|v|}{2}; \end{aligned}$$

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

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

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

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

Після цього використовуємо таку схему розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (7):

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

Невідоме значення температури  $T$  в кожному рівнянні визначаємо за формулою біжного підрахунку.

Для чисельного інтегрування рівняння (7) використовуємо таку залежність:

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

Якщо в зоні досліджень розташовані перешкоди (будівлі тощо), то для визначення поля швидкості повітряного потоку використовуємо модель потенціального руху. У цьому випадку для двовимірних задач аеродинаміки використовуємо таке рівняння:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

де  $P$  – потенціал швидкості.

Компоненти вектора швидкості вітру визначаємо так:

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

Рівняння тривимірної задачі аеродинаміки матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (9)$$

Компоненти вектора швидкості вітру для тривимірного процесу руху визначаємо так :

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Граничні умови для рівняння Лапласа розглянуто в [3].

Для розв'язання рівняння (8) використовуємо явну різницеву схему. Попереднє рівняння Лапласа зводимо до рівняння еволюційного вигляду, а далі використовуємо таку різницеву схему:

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

Розрахунок закінчуємо, коли виконано умови:

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

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

Значення компонент швидкості розраховуємо на сторонах комірок так:

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

Для чисельного інтегрування рівняння (9) використовуємо метод А. А. Самарського.

Чисельне інтегрування рівнянь (3) і (4) здійснюємо за методом Ейлера [3]. За допомогою цього методу визначаємо значення компонент швидкості руху уламка  $u$ ,  $v$  на новому часовому шарі « $n+1$ », а далі розраховуємо дальність відльоту уламка  $x(t)$ . Розрахункові залежності мають вигляд :

$$u^{n+1} = u^n - dt * C_x \frac{\rho_\varepsilon V^2}{2m} \cdot S; \quad (10)$$

$$v^{n+1} = v^n - dt * C_x \frac{\rho_\varepsilon V^2}{2m} \cdot S - dt * g; \quad (11)$$

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

де  $x_0$  – координата місця відльоту уламка.

Для проведення розрахунку на базі залежностей (3) і (4) потрібно задати кут  $\alpha$  вильоту уламка. Значення цього параметра визначають на базі експертних оцінок. Здійснено програмування побудованих чисельних моделей та розроблено спеціальний пакет програм, що дозволяє комплексно розв'язувати задачі теплового, хімічного та механічного забруднення довкілля.

## Результати

На першому етапі досліджень здійснено верифікацію чисельної моделі для прогнозування рівня температурного забруднення повітря. Для цього розглянуто процес руху нагрітого повітря від теплонагрівача. Перед ним розташовано модель будівлі (рис. 1). Ставимо задачу виміряти температуру повітря уздовж моделі будівлі та порівняти результати експерименту з розрахунком на базі чисельних моделей аеродинаміки та теплопереносу. Швидкість повітряного потоку визначаємо за допомогою анемометра GM 8908 (1,82–2,12 м/с). Розміри моделі будинку: 14\*7\*5см. Довжина від моделі до вентилятора 12 см. Температуру виміряно за допомогою приладу FY-12 (рис. 2).

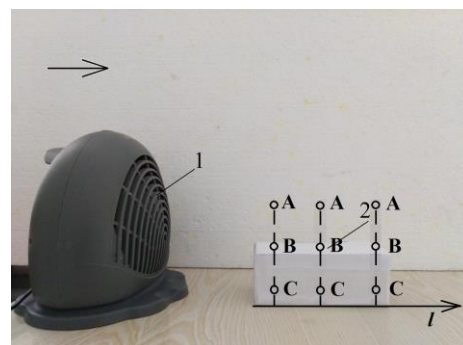


Рис. 1. Точки заміру температури: 1 – тепловентилятор; 2 – модель будинку

Fig. 1. Temperature measurement points: 1 – fan heater; 2 – house model

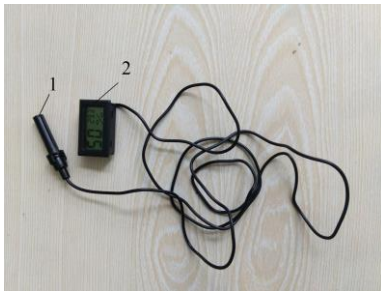


Рис. 2. Обладнання:

1 – датчик; 2 – вимірювач температури

Fig. 2. Equipment:

1 – sensor; 2 – a temperature meter

Оскільки для математичного моделювання використовують двовимірну математичну модель, то для порівняння експериментальних даних, отриманих на тривимірній фізичній моделі, з розрахунковими необхідно провести осереднення результатів вимірювання. Тому було застосовано методологію осереднення даних вимірювання за висотою. Для цього обрано 3 перерізи вздовж моделі будинку. Перший переріз знаходився за 2 см від кутової точки моделі, другий – за 6 см, а третій – за 10 см. У кожному перерізі  $l^m$  ( $m=1-3$ ) проведено вимірювання температури на різній висоті:  $h_1=2$  см – точка  $C(t_1)$ ;  $h_2=6$  см – точка  $B(t_2)$ ;  $h_3=10$  см – точка  $A(t_3)$ . Вимірювання температури проведено на відстані 1 см від стінки моделі будівлі. Далі розраховано осереднене значення температури з висотою в кожному перерізі:

$$t_i^m = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{8 \text{ см}},$$

$i = 1-3$ ;  $m = 1-3$ .

Розрахунок здійснено за допомогою розроблених чисельних моделей.

Під час розрахунку взято, що швидкість повітряного потоку становить 1,85 м/с. Порівняння розрахункових та експериментальних даних наведено нижче в таблиці 1.

Аналізуючи дані з табл. 1, бачимо задовільне узгодження між експериментальними даними та даними розрахунку.

Далі проведено обчислювальний експеримент на базі розроблених чисельних моделей. Узято, що на момент виникнення екстремальної ситуації на залізничній станції швидкість вітру становила 5 м/с; температура повітря на місці пожежі – 1 100 °С; початкова швидкість стале-

вого уламка 70 м/с; коефіцієнт опору уламка 0,4; висота викиду уламка 5 м; зведений діаметр уламка 0,004 м; кут вильоту уламку  $\alpha = 15^\circ$ .

Таблиця 1

## Температура вздовж моделі будівлі

Table 1

## Temperature along the building model

Відстань $x$ , см	Експеримент	Розрахунок
2	60,5 °С	58,2 °С
6	59,5 °С	56,7 °С
10	58,6 °С	55,2 °С

Результати моделювання показано на рис. 3–7.

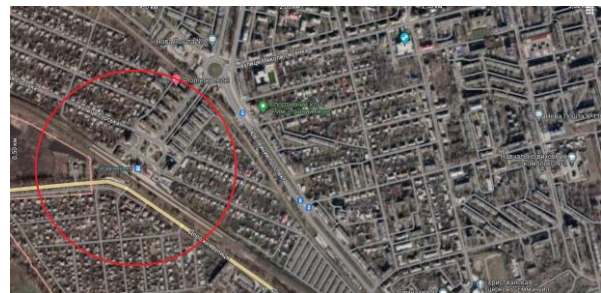
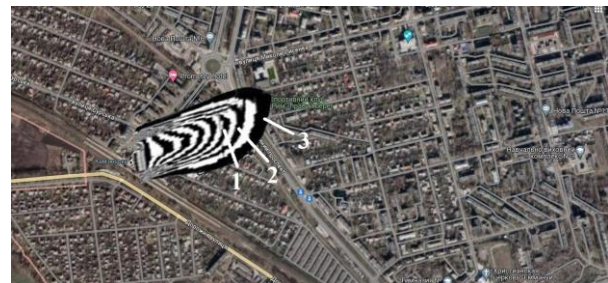


Рис. 3. Зона ураження під час розлітання уламків

Fig. 3. The damage zone when fragments fly

Як можемо бачити з рис. 3, у випадку екстремальної ситуації виникає ризик ураження людини біля залізниці.

На рис. 4–5 показано зону теплового забруднення повітря під час пожежі цистерн на залізниці.

Рис. 4. Зона теплового забруднення,  $t = 4,5$  хв:1 –  $T = 223$  °С; 2 –  $T = 117$  °С; 3 –  $T = 93$  °СFig. 4. Area of thermal pollution,  $t = 4,5$  min:1 –  $T = 223$  °С; 2 –  $T = 117$  °С; 3 –  $T = 93$  °С

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

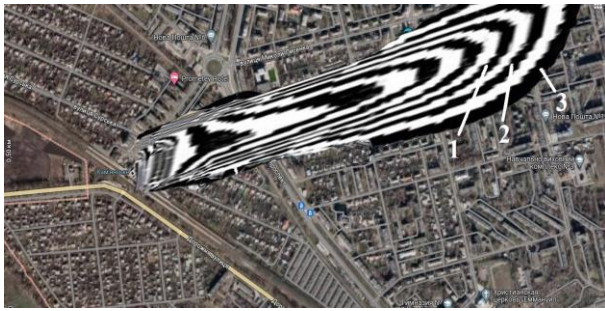


Рис. 5. Зона теплового забруднення,  $t = 8,2$  хв:  
 $1 - T = 114$  °C;  $2 - T = 82$  °C;  $3 - T = 57$  °C

Fig. 5. Area of thermal pollution,  $t = 8,2$  min.:  
 $1 - T = 114$  °C;  $2 - T = 82$  °C;  $3 - T = 57$  °C

Як можемо бачити з рис. 4 і 5, у разі виникнення екстремальної ситуації буде мати місце інтенсивне теплове забруднення повітря в зоні забудови. Температура в зоні забудови буде перевищувати 100 °C. Таким чином, це спричинить термічне ураження людини.

На рис. 6 і 7 показано динаміку формування зон хімічного забруднення (продукт горіння – CO).

Аналіз результатів моделювання (рис. 6, 7) показує, що в разі екстремальної ситуації на залізниці виникає ризик токсичного ураження людей (ГДК CO дорівнює 20 мг/м<sup>3</sup>).



Рис. 6. Зона хімічного забруднення,  $t = 9$  хв:  
 $1 - C = 77$  мг/м<sup>3</sup>;  $2 - C = 58$  мг/м<sup>3</sup>;  
 $3 - C = 24$  мг/м<sup>3</sup>

Fig. 6. Area of chemical pollution,  $t = 9$  min:  
 $1 - C = 77$  мг/м<sup>3</sup>;  $2 - C = 58$  мг/м<sup>3</sup>;  
 $3 - C = 24$  мг/м<sup>3</sup>



Рис. 7. зона хімічного забруднення,  $t = 21$  хв:  
 $1 - C = 74$  мг/м<sup>3</sup>;  $2 - C = 53$  мг/м<sup>3</sup>;  
 $3 - C = 23$  мг/м<sup>3</sup>

Fig. 7. Area of chemical pollution,  $t = 21$  min:  
 $1 - C = 74$  мг/м<sup>3</sup>;  $2 - C = 53$  мг/м<sup>3</sup>;  
 $3 - C = 23$  мг/м<sup>3</sup>

### Наукова новизна та практична значимість

На базі створених математичних моделей розроблено пакет комп'ютерних програм для комплексного оцінювання рівня забруднення атмосфери в селітебних зонах в разі надзвичайної ситуації на залізниці.

Розроблені математичні моделі належать до класу «diagnostic models», тобто орієнтовані на швидке отримання прогнозованих даних для оцінювання рівня небезпеки під час екстремальної ситуації.

### Висновки

1. Розроблено пакет програм, що дає можливість комплексно оцінювати різні типи забруднення довкілля в разі надзвичайної ситуації на залізниці.

2. Прогнозування інтенсивності хімічного, теплового, механічного забруднення довкілля за екстремальних ситуацій здійснено за допомогою відомих математичних моделей механіки суцільного середовища, що дозволяє отримати науково обґрунтовані дані моделювання.

3. Результати обчислювального експерименту показують, що потрібно розробляти заходи для населення, що мешкає біля залізниці.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях*: монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. 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.
3. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.

4. Abbaslou H., Karimi A. Modeling of ammonia emission in the petrochemical industry. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.5812/jjhs.94101>
5. Biliaiev M., Rusakova T., Dziuba S., Lapshin Ye., Koval N. Assessment of Radioactive Contamination Level of Environment in Case of Accident at Nuclear Power Plant. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1156. Iss. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.310056>
6. Khorram R. Modeling the consequences release of cyanogen agents in bushehr nuclear power plant neighborhood using PHAST, ALOHA and WISER software. *Iran Occupational Health*. 2020. Vol. 17. Iss. 1. P. 1–13.
7. Liu Y., Wang J. Numerical simulation analysis of fire hazard from leakage and diffusion of vinyl chloride in different atmospheric environments. *Fire*. 2022. Vol. 5. Iss. 2. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5020036>
8. Sharifi S. R., Razavian F. Hazard Identification and Consequences Analysis of Possible Accidents in the Tank Farm & Flare of the ILAM Gas Refinery by ETBA and PHAST Software. *Journal of Environmental Sciences and Technology*. 2020. Vol. 22. Iss. P. 309–322.
9. Ustolin F., Tolias I. C., Giannissi S. G., Venetsanos A. G., Paltrinieri N. A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions Process. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 159. P. 61–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.048>
10. Yarandi M. S., Mahdinia M., Barazandeh J., Soltanzadeh A. Evaluation of the toxic effects of ammonia dispersion: consequence analysis of ammonia leakage in an industrial slaughterhouse. *Medical Gas Research*. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.310056>

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

<sup>1</sup>Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 374 82 89, e-mail [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>2</sup>Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «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. «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Ave., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID 0000-0001-9434-2367

<sup>5</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

## Predicting the Consequences of an Emergency at a Railway Station

**Purpose.** The paper considers the problem of determining the size of the damage zones in the event of an emergency at a railway station due to a tanker fire. The task of forecasting is to determine the zones of thermal pollution, as well as chemical and mechanical pollution. The main objective of the study is to create numerical models for calculating the zones of mechanical and thermal pollution in the event of a fire at a railway station. **Methodology.** To analyze the size and intensity of zones of thermal, chemical, and mechanical environmental pollution in the event of an extreme situation at a railway station, we used the equations of heat and mass transfer and Newton's second law for modeling mechanical environmental pollution. To solve the equations, numerical methods such as Euler's method and finite difference schemes were used. On the basis of the developed numerical models, a computer code was created to conduct a computational experiment. **Findings.** Modern computer models for assessing the zones of chemical, thermal, and mechanical pollution in the event of an extreme situation have been developed. The results of computer modeling are presented. **Originality.** A set of numerical models for computer simulation of heat and mass transfer processes and dynamics of point motion has been created, which allows conducting a computational experiment to determine the contamination zones during a fire at a railway station. **Practical value.** A computer code was developed on the basis of the created mathematical models. This code is a tool for solving important problems in the field of environmental safety and civil protection. The computer code makes it possible to quickly determine the intensity and size of environmental pollution zones in the event of an extreme situation.

*Key words:* chemical contamination; thermal contamination; flying debris; numerical modeling

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V. & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannia v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochykh mistsiakh*: monografiya. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniia v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
3. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Abbaslou, H., & Karimi, A. (2019). Modeling of Ammonia Emission in the Petrochemical Industry. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 11(3), 1-7. DOI: <https://doi.org/10.5812/jjhs.94101> (in English)
5. Biliaiev, M., Rusakova, T., Dziuba, S., Lapshin, Ye. & Koval, N. (2023) Assessment of Radioactive Contamination Level of Environment in Case of Accident at Nuclear Power Plant. In *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1156, Iss. 1, pp 1-7). DOI: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.310056> (in English)
6. Khorram, R. (2020). Modeling the consequences release of cyanogen agents in bushehr nuclear power plant neighborhood using PHAST, ALOHA and WISER software. *Iran Occupational Health*, 17(4), 1-13. (in English)
7. Liu, Y., & Wang, J. (2022). Numerical Simulation Analysis of Fire Hazard from Leakage and Diffusion of Vinyl Chloride in Different Atmospheric Environments. *Fire*, 5(2), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5020036> (in English)
8. Sharifi, S. R., & Razavian, F. (2020). Hazard Identification and Consequences Analysis of Possible Accidents in the Tank Farm & Flare of the ILAM Gas Refinery by ETBA and PHAST Soft wear. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 22(8), 309-322. (in English)
9. Ustolin, F., Toliás, I. C., Giannisi, S. G., Venetsanos, A. G., & Paltrinieri, N. (2022). A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 61-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.048> (in English)
10. Yarandi, M. S., Mahdinia, M., Barazandeh, J., & Soltanzadeh, A. (2021). Evaluation of the toxic effects of ammonia dispersion. *Medical Gas Research*, 11(1), 24-29. DOI: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.310056> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.05.2024

Прийнята до друку: 16.09.2024

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.4.016.12:[004.94:621.316-047.37]

Є. М. ЧУПРИНА<sup>1\*</sup>, А. М. МУХА<sup>2\*</sup>, О. І. БОНДАР<sup>3\*</sup>, С. В. ПЛАКСІН<sup>4\*</sup>

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

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

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

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

## Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля

**Мета.** Основна ідея роботи полягає у тому, що електрична енергія, яку генерують фотоелектричні установки, малими частинами надходить до ємнісних накопичувачів енергії малої потужності, а далі ці «порції» енергії надходять в один спільний, так званий тяговий накопичувач. Дослідження спрямоване на отримання часових діаграм зміни струму та напруги в запропонованій системі. **Методика.** Проведено огляд світової літератури щодо теми роботи. За основу цього дослідження взято аналіз перехідних процесів в електричних колах системи, під час передачі енергії від фотоенергетичного модуля до тягового конденсатора під дією різних сигналів керування: послідовного, паралельного, суміщеного. Основним методом досліджень є імітаційне комп'ютерне моделювання. Для моделювання роботи системи накопичення електричної енергії використано програмне середовище Scilab. **Результати.** Доведено актуальність дослідження та розробки системи первинного накопичення електричної енергії з використанням тягового фотоенергетичного модуля. Установлено ключові математичні залежності між параметрами складових елементів електричних кіл. Запропоновано структуру ділянки з накопичувачами електричної енергії з тяговими фотоенергетичними модулями, а також блоком «перетворювач – імпульсний сигнал». Отримано графічні характеристики перехідних процесів, які відбувалися під час передачі енергії від ємнісних елементів малої потужності до ємнісного елемента великої потужності (тягового конденсатора). **Наукова новизна.** Уперше отримано графічні залежності передачі енергії між елементами системи, що дозволяє провести обґрунтований вибір параметрів цих елементів. Також вперше отримано часові залежності, які описують закон керування процесом передачі енергії між ланками системи, що дозволить визначити раціональні режими її роботи. **Практична значимість.** За результатами досліджень відкриваються нові можливості в дослідницькій сфері при розробці масштабних експериментальних моделей шляхової структури маглева в разі впровадження системи розподільного первинного накопичення електроенергії в тяговому фотоенергетичному модулі.

**Ключові слова:** фотоенергетичний модуль; тяговий конденсатор; магнітолевітаційний транспорт; шляхова структура; перехідні процеси; комп'ютерне моделювання

### Вступ

На сучасному етапі розвитку техніки магнітолевітаційний транспорт є найбільш перспективним видом наземного транспорту [2],

упровадження якого дає змогу знівелювати певну низку недоліків, пов'язаних із використанням традиційних транспортних систем. Підвищення швидкості руху та сили тяги в традиційних залізничних системах

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

обмежено силами зчеплення з поверхнею, по якій прямує екіпаж. Не менш важливим є використання енергетичних ресурсів та екологічна безпека, яка безпосередньо від цього залежить, наприклад, транспортні системи, які працюють на двигунах внутрішнього згорання, мають негативний вплив через викид шкідливих газів у навколишнє середовище.

Одним із перших етапів упровадження новітніх систем є цикл науково-дослідних робіт, які вимагають створення відповідних полігонів. Як показує світовий досвід, побудова великих полігонів для дослідження складних систем є нерациональною [6]. Для створення та подальшого дослідження моделі магнітолевітаційного транспорту, побудованого за новим принципом шляхової структури, запропоновано застосувати метод масштабування моделювання. Це значно полегшить розробку масштабної моделі, а також дозволить провести глибокий аналіз роботи системи в різних режимах. Стає можливим проаналізувати динаміку протікання перехідних процесів, оцінити ефективність моделі та виявити основні можливості системи.

Використання масштабного моделювання відкриє можливість перевірити працездатність системи на практиці, визначити можливі помилки експериментальної установки, що дозволить нівелювати та скорегувати її роботу. Розвиток цього методу можна спостерігати в [8], де за його допомогою реалізовано розробку деяких спеціальних електричних машин (двигун приводу помпи) в штучному серці. Принцип роботи масштабованого дослідного стенда для діагностики стану електромеханічних систем наявний у [5].

Аналог дослідницької установки для магнітолевітаційного транспорту подано в [12], автори запропонували концепцію, у якій безпосередньо було використано масштабування моделі у співвідношенні 1 до 10. У ході експериментальних досліджень характеристики та результати розробленого стенда в цілому задовольнили очікування.

Перспективним напрямом підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у транспортних засобах та системах є впровадження нових технологій, зокрема у сфері відновлювальної енергетики, а також накопичення

енергії для подальшого її використання в необхідний момент часу.

Одним із напрямів підвищення енергетичної ефективності транспортних засобів є використання фотоенергетичних установок та накопичувачів енергії, які спроможні в найкоротший термін передавати енергію транспортному засобу, коли це буде необхідно. Автори [9] досліджують використання сонячної енергії, проводять аналіз, які ж країни наразі роблять найбільший внесок у розвиток цієї галузі.

Альтернативу запропоновано у [10], де керування транспортною системою відбувалося з допомогою мікроконтролера. За результатами цього дослідження автори відзначили, що порівняно з маглевом традиційної конструкції їх варіація вигідніша у 8 разів.

Автор [1] також підтримує впровадження фотоенергетичних систем у структуру маглева, але дещо відмінну. У цій розробці весь шлях, по якому прямує потяг був закритий дахом, у верхній частині якого розташовані сонячні панелі, що поглинають світло та виступають як екологічно чисте джерело енергії.

Автори [3] розробили метод раціонального управління динамічними режимами роботи накопичувачів енергії для підвищення ефективності їх експлуатації у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів. Цей спосіб дозволяє в режимі реального часу стежити за станом накопичувачів та вчасно розв'язувати проблемні питання.

## Мета

Завдання впровадження магнітолевітаційного транспорту безпосередньо передбачає з розв'язання низки механічних проблем, які стосуються зокрема роботи та вдосконалення системи тягового електропостачання, особливо в контексті загальних тенденцій щодо збільшення використання відновлювальних енергетичних ресурсів та вирішення екологічних проблем.

Суть цієї статті полягає в тому, що електрична енергія, яка генерується розподіленими вздовж шляхової структури маглева фотоелектричними установками малої потужності, малими частинами передається до ємнісних накопичувачів енергії малої потужності, далі ці «порції» енергії передаються в один спільний

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

так званий тяговий накопичувач. Наше дослідження спрямоване на отримання часових діаграм зміни струму та напруги в запропонованій системі.

## Методика

Це дослідження базується на аналізі перехідних процесів в електричних колах системи, під час передачі енергії від фотоенергетичного модуля до тягового конденсатора під дією різних сигналів керування: послідовного, паралельного, суміщеного.

Основним методом досліджень є імітаційне комп'ютерне моделювання. Для моделювання роботи системи накопичення електричної енергії було використано програмне середовище Scilab.

На накопичувачі малої потужності була подана напруга 12 В, після чого вони почали накопичувати електричну енергію. Після повного заряду накопичувачі передають її на тяговий конденсатор. Під час моделювання перехідних процесів було обрано тривалість діапазону моделювання 0,1 с. У результаті дослідження з використання установки отримуємо числові значення та графічні характеристики, що поліпшать розуміння роботи створюваної системи розподільчого накопичення електроенергії тягового фотоенергетичного модуля.

Фотоенергетичні установки вбудовані у шляхову структуру, по якій прямує екіпаж, передають свою енергію накопичувачам малої потужності. У потрібний час ці накопичувачі через імпульс передають накопичену енергію в один великий накопичувач (тяговий конденсатор). Імпульс енергії дозволяє швидко та без будь-яких перешкод від сусідніх елементів передати енергію від малих накопичувачів до тягового.

Схема для дослідження має структуру, яка складається з певних компонентів, а саме: джерело живлення (фотоенергетична установка), резистори та конденсатори, які створюють певну систему RC-контурів, частина якої проілюстрована (рис. 1).

Дослідження полягає у визначенні перехідних процесів та отриманні характеристик у період перетікання заряду конденсаторів малої потужності у конденсатор великої потужності (тяговий). Сам процес розрядження конденсатора через інший конденсатор є явищем, під час

якого накопичена енергія переходить від одного конденсатора до іншого. На початку роботи системи візьмемо, що напруга на тяговому конденсаторі  $u_{C1}$  буде різною після розрядження в нього кожного з конденсаторів.

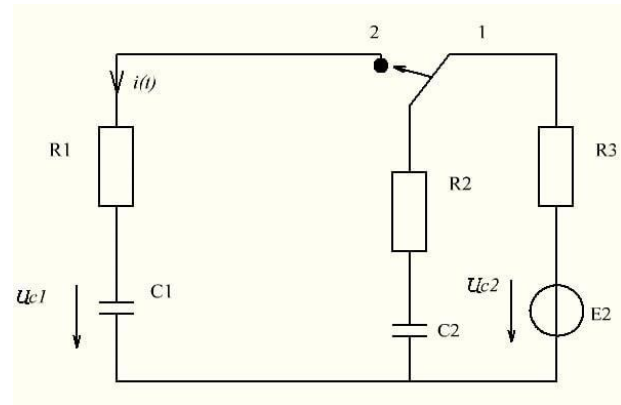


Рис. 1. Принципова схема підключення первинного накопичувача RC

Fig. 1. Schematic diagram of the primary RC drive connection

Процес розрядження конденсатора через інший конденсатор можна описати за допомогою певних рівнянь, які відображають зміну заряду та напруги з часом.

Рівняння електромагнітного стану кола в післякомутаційному режимі матимуть вигляд (1–3):

$$R_2 \cdot i(t) + R_1 \cdot i(t) + u_{C1}(t) - u_{C2}(t) = 0; \quad (1)$$

$$i(t) = C_1 \frac{du_{C1}(t)}{dt}; \quad (2)$$

$$i(t) = C_2 \frac{du_{C2}(t)}{dt}. \quad (3)$$

Тоді розв'язок для перехідної напруги згідно з класичним методом аналізу перехідних процесів можна представити у вигляді двох складових:

$$u_{C1}(t) = U_{C1y} + u_{C16}(t), \quad (4)$$

де  $U_{C1y}$  – усталена складова напруга на конденсаторі  $C_1$ ;  $u_{C16}$  – вільна складова напруги на конденсаторі  $C_2$ .

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Після закінчення перехідного процесу в установленому режимі перехідний струм у колі відсутній, і відповідно до схеми (рис. 1) напруги на обох конденсаторах однакові:

$$U_{C1y} = U_{C2y} = U_{Cy} = \text{const.} \quad (5)$$

Сумарний заряд у системі після комутації за умови повністю розрядженого конденсатора  $C_1$  можна описати виразом:

$$Q = u_{C2}(0) \cdot C_2, \quad (6)$$

де  $u_{C2}(0)$  — перехідна напруга на конденсаторі  $C_2$  в момент комутації, яка другим класичним законом комутації становитиме:

$$u_{C2}(0) = u_{C2}(-0) = E_2. \quad (7)$$

Після закінчення перехідного процесу сумарний заряд системи перерозподілиться на обидва конденсатори згідно з виразом:

$$Q = C_1 \cdot U_{Cy} + C_2 \cdot U_{Cy}. \quad (8)$$

Тоді згідно з виразами (7) – (8)  $U_{Cy}$  визначимо так:

$$U_{Cy} = \frac{u_{C2}(0) \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{E_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (9)$$

Далі переходимо до визначення вільної складової шуканої перехідної величини. Для цього перш за все складаємо характеристичне рівняння кола (рис. 1). Зазначене рівняння має вигляд:

$$Z(p) = \frac{1}{p \cdot C_1} + R_1 + R_2 + \frac{1}{p \cdot C_2} = 0. \quad (10)$$

Звідси корінь характеристичного рівняння дорівнює:

$$p = -\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 (R_1 + R_2)}. \quad (11)$$

Відповідно вільну складову шуканої напруги запишемо у вигляді:

$$u_{iB}(t) = A \cdot e^{pt}, \quad (12)$$

де  $A$  – постійна інтегрування;  $p$  – корінь характеристичного рівняння.

Постійне інтегрування визначаємо за допомогою початкових умов:

$$A = u_{C1}(0) - U_{Cy}. \quad (13)$$

У виразі (13) за умови повністю розрядженого початкового стану конденсатора  $C_1$  за другим класичним законом комутації маємо  $u_{C1}(0) = u_{C1}(-0) = 0$ , тоді постійна інтегрування дорівнює:

$$A = -U_{Cy}. \quad (14)$$

Таким чином, прикінцевий вираз шуканої перехідної напруги на тяговому конденсаторі записуємо так:

$$u_{C1}(t) = \frac{E_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} - \frac{E_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 (R_1 + R_2)} t}. \quad (15)$$

При цьому закон зміни перехідного струму у колі можна отримати зі співвідношення (2) з урахуванням виразу (15).

Далі розглянемо перехідні процеси в разі наявності попереднього заряду на конденсаторі  $C_1$ . У такому випадку вираз (6) набуває вигляду:

$$Q = u_{C2}(0) \cdot C_2 + u_{C1}(0) \cdot C_1; \quad (16)$$

$$u_{C1}(0) = U_{Cy}. \quad (17)$$

Тоді шукану перехідну величину напруги на конденсаторі  $C_1$  запишемо так:

$$u_{C1(i+1)} = U_{C1y(i+1)} + C_2 \cdot U_{C1B(i+1)}. \quad (18)$$

Співвідношення (8) при цьому набуває вигляду:

$$Q = C_1 \cdot U_{Cy(i+1)} + C_2 \cdot U_{Cy(i+1)}. \quad (19)$$

Отже, прирівнюючи вирази (16) та (19) з урахуванням співвідношення (17), визначаємо установлене значення напруги на ємності  $C_1$ :

$$U_{Cy(i+1)} = \frac{E_2 \cdot C_2 + U_{Cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2}. \quad (20)$$

Вільна складова шуканої напруги буде мати вигляд виразу (12), у якому корінь характеристичного рівняння визначаємо за співвідношенням (11), а постійну інтегрування  $A$  знаходимо за виразом (13), тобто:

$$A = U_{cy} = -\frac{E_2 \cdot C_2 + U_{cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2}. \quad (21)$$

Тоді шукана величина перехідної напруги набуває такого остаточного вигляду:

$$u_{C1(i+1)}(t) = \frac{E_2 \cdot C_2 + U_{cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2} + (U_{cy} - \frac{E_2 \cdot C_2 + U_{cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2}) e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 (R_1 + R_2)} t}. \quad (22)$$

При цьому величину перехідного струму також можна визначити за виразом (2) з урахуванням отриманого співвідношення (22).

Представлені вище аналітичні залежності дозволяють провести обґрунтований вибір параметрів експериментальної системи, для забезпечення максимальної енергоефективності передачі та зберігання енергії. Як вказано вище, світовий досвід ґрунтується на використанні масштабних моделей. Розглянемо таку модель запропонованої фотоенергетичної установки.

### Результати

Експериментально-дослідницька установка матиме кругову форму, фотоенергетичні елементи знаходяться із зовнішньої сторони шляхової структури.

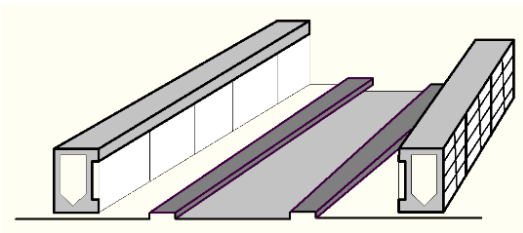


Рис. 2. Частина шляхової структури з фотоелектричними установками

Fig. 2. Part of the track structure with photovoltaic installations

Фотоенергетичні елементи використовують для подання електричної енергії в накопичувачі малої потужності, які передають «порції» енергії в один тяговий накопичувач максимально швидко.

Досліджувана система складається з фотоенергетичних модулів, конденсаторів малої ем-

ності, перемикачів, блока перетворювача напруги в імпульсний сигнал та тягового конденсатора (рис. 3).

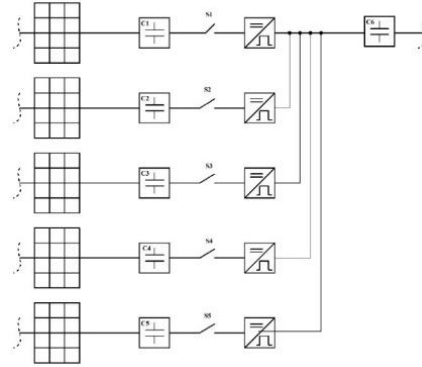


Рис. 3. Блок первинного накопичення енергії

Fig. 3. Primary energy storage unit

Формування вихідного імпульсу буде залежати від певних факторів та задач, поставлених у дослідженні, керування процесами рухомого складу. Приклади варіантів вихідних імпульсів наведено на рис. 4–5.

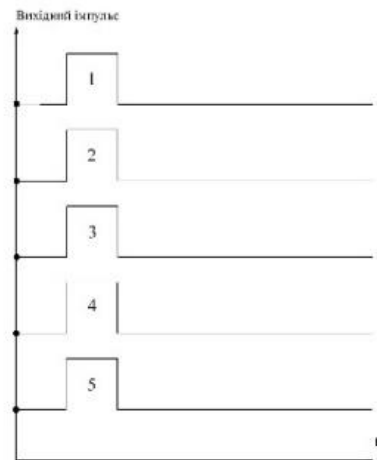


Рис. 4. Одночасне вмикання накопичувачів

Fig. 4. Turning on the drives simultaneously

У випадку, коли накопичувачі малої потужності починають передавати накопичену енергію тяговому конденсатору, перехідні процеси відбуваються одночасно, що може негативно вплинути на роботу системи, зокрема через те, що опір на виході буде вищим, ніж у наступному випадку.

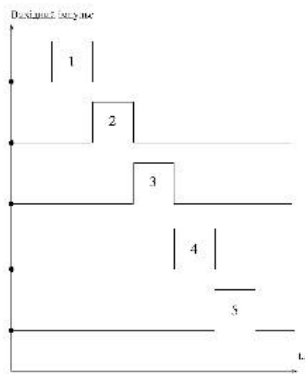


Рис. 5. Послідовне вмикання накопичувачів

Fig. 5. Powering up drives in sequence

У разі послідовного вмикання накопичувачів спостерігається плавне перетікання перехідних процесів. За рахунок того, що опори під'єднані паралельно, результуючий опір буде малим, це має позитивний вплив на роботу системи.

Для реалізації системи було обрано програмне середовище Scilab, яке дозволяє використовувати його у вільному доступі. Завдяки йому можна моделювати систему та встановлювати необхідні значення, такі як: вхідна напруга, частота, опори елементів, тривалість та затримка подачі імпульсу на конденсатор. У процесі моделювання системи отримуємо графіки, які дають можливість проаналізувати результати, оцінити працездатність та доцільність роботи системи.

На накопичувачі малої потужності подаємо напругу 12 В, а вони передають накопичену енергію до тягового накопичувача. Схему системи та її елементів подано на рис. 6.

У результаті моделювання системи тягового фотоенергетичного модуля отримано графіки характеристик поведінки напруги та струму на тяговому конденсаторі, із яких видно, як саме протікали перехідні процеси під час повного циклу роботи (рис. 7).

На рис. 7 можна побачити плавне зростання напруги, плавне та рівномірне протікання перехідного процесу. Графік характеристики поведінки струму під час перехідного процесу свідчить про те, що в ньому відбуваються зміни заряду чи розряду. Це можливо в тому випадку, коли конденсатор швидко заряджається або розряджається до певного усталеного рівня, після чого цей процес може повторюватися декілька разів.

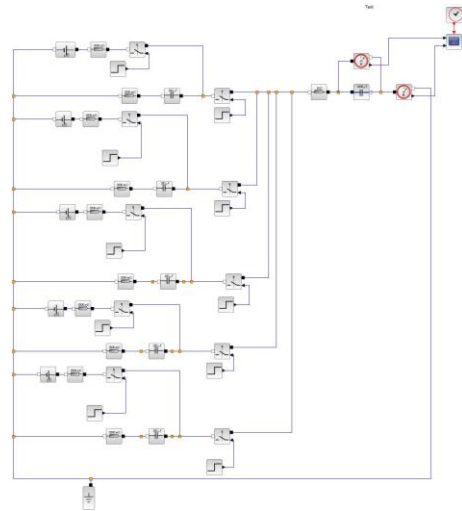


Рис. 6. Функціональна схема тягового фотоенергетичного модуля

Fig. 6. Functional diagram of the traction photovoltaic module

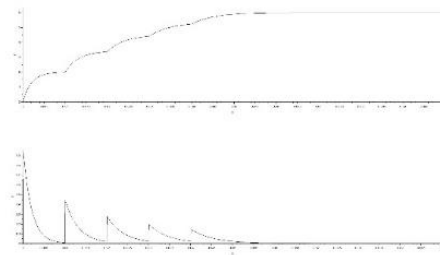


Рис. 7. Графік напруги та струму під час перехідного процесу

Fig. 7. Voltage and current graph during the transient process

Також за допомогою цієї моделі можна перевірити очікувані графіки формування вихідних імпульсів та порівняти їх із реальними (рис. 8–9).

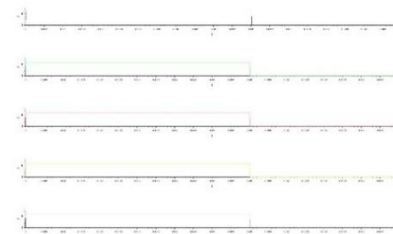


Рис. 8. Вихідні імпульси під час одночасного вмикання накопичувачів

Fig. 8. Output pulses during simultaneous washing of the drives

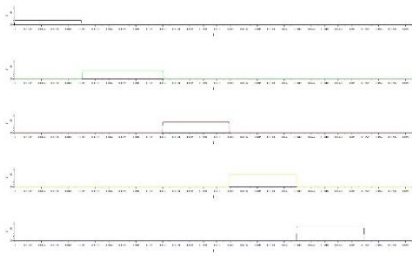


Рис. 9. Послідовне вмикання накопичувачів

Fig. 9. Powering up the drives in sequence

Із порівняння графіків очікуваних та отриманих під час дослідження роботи установки можна зробити висновок, що результати роботи системи тягового фотоенергетичного модуля задовольняють початковим вимогам.

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше отримано графічні залежності передачі енергії між елементами системи, що дозволяє провести обґрунтований вибір параметрів системи. Також уперше отримано часові залежності, які описують закон керування процесом передачі енергії між ланками системи, що дозволить визначити раціональні режими роботи цієї системи.

Завдяки отриманим результатам досліджень відкриваються нові можливості в дослідницькій сфері для розробки масштабних експериментальних моделей шляхової структури маглева в разі впровадження системи розподільного первинного накопичення електроенергії в тяговому фотоенергетичному модулі.

### Висновки

Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля дозволило виявити значний потенціал у подальшому розвитку магнітолевітаційних транспортних систем. Електрична енергія, яку генерують розподілені вздовж шляхової структури фотоелектричні установки, малими частинами надходить до ємнісних накопичувачів енергії малої потужності, а далі ці «порції» енергії надходять в один спільний накопичувач – тяговий.

Така варіація реалізації системи відкриває нові можливості до створення екологічно чистих та енергоефективних транспортних систем, що позитивно впливає на зовнішнє середовище, а також підвищує ефективність роботи системи в цілому.

У результаті комп'ютерного моделювання отримано графіки часових характеристик перехідних процесів, що протікають у накопичувачах. На них представлено, як змінюються струм та напруга, а також динаміка самого перехідного процесу, його тривалість. Із графіків видно, що напруга із закінченням перехідного процесу на тяговому конденсаторі досягла усталеного значення, а струм упав до 0. Час протікання перехідного процесу напруги та струму збігається, тобто становить 0,06 с.

Представлені результати проведених досліджень підкреслюють важливість подальших досліджень, розробок та оптимізації магнітолевітаційних транспортних систем, розвитку нових технологій, що значно поліпшать ефективність експлуатації транспортних систем і підвищать їх надійність за різних умов.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Шкіль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>
2. Муха А. М., Плаксин С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
3. Плаксин С. В., Муха А. М., Устименко Д. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Чуприна Є. М., Голота О. О. Метод оперативного контролю та управління електрохімічним накопичувачем енергії у складі систем електрозабезпечення транспортних засобів. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6 (96). С. 39–52. DOI: <https://doi.org/doi:10.15802/stp2021/258172>

4. Covaci M.-A., Gălătuș R. V., Petreuş D. M., Szolga L. A. Renewability and Robustness Analysis and Review for Sustainable-Technology Propulsion Systems in Modern Transportation Infrastructure Administration. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 24. P. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132413026>
5. Esteban E., Salgado O., Iturrospe A., Isasa I. Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis. *Mechatronics*. 2017. Vol. 47. 2017. P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005>
6. Harvey, J. T. Complex Systems Theory and Development Practice. *Journal of Economic Issues*. 2006. Vol. 38. Iss. 3. P. 861–862. DOI: <https://doi.org/10.1080/00213624.2004.11506738>
7. Jafaryar M., Sheikholeslami M. Efficacy of magnetic field on performance of photovoltaic solar system utilizing ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 562. P. 169798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169798>
8. Moschoudis A. P., Tsekouras G. J., Kanellos F. D., Kladas A. G. Particular SRM Design Methodology Based on Similarity Theory, Scale Factors and FEM. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 856. P. 269–275. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.856.269>
9. Novas N., Garcia R. M., Camacho J. M., Alcayde A. Advances in Solar Energy towards Efficient and Sustainable Energy. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 11. P. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116295>
10. Qadir Z., Munir, A., Ashfaq T., Munawar H. S., Khan M. A., Le K. A prototype of an energy efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 4. P. 100217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217>
11. Ramireddy V. Innovative Approach to Maglev Trains (Solar Energy). *Electrical Engineering Portal*. 2012. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/innovative-approach-to-maglev-trains-solar-energy>
12. Wiesman R., Fontana R., Cope D., Gamble B. Design and Demonstration of a Locally Commutated Linear Synchronous Motor. *SAE Transactions*. 1995. Vol. 104. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.4271/951919>

Y. M. CHUPRYNA<sup>1\*</sup>, A. M. MUKHA<sup>2\*</sup>, O. I. BONDAR<sup>3\*</sup>, S. V. PLAKSIN<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 360 37 88, e-mail [nesty.lords@gmail.com](mailto:nesty.lords@gmail.com), ORCID 0000-0002-0986-1283

<sup>2\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail [mukha.andrii@gmail.com](mailto:mukha.andrii@gmail.com), ORCID 0000-0002-5629-4058

<sup>3\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 333 88 96, e-mail [etemdiit@gmail.com](mailto:etemdiit@gmail.com), ORCID 0000-0003-3884-5589

<sup>4\*</sup>Dep. of Vehicle Control Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail [svp@westa-inter.com](mailto:svp@westa-inter.com), ORCID 0000-0001-8302-0186

## Research of the Primary Electric Energy Storage System of a Traction Photovoltaic Module

**Purpose.** The main idea of the work is that the electric energy generated by photovoltaic installations is supplied in small parts to capacitive energy storage devices of low power, and then these «portions» of energy are supplied to one common, so-called traction storage device. The research is aimed at obtaining time diagrams of current and voltage changes in the proposed system. **Methodology.** A review of the world literature on the topic of work was conducted. The basis of this research is the analysis of transient processes in the electrical circuits of the system during the transfer of energy from the photovoltaic module to the traction capacitor under the influence of various control signals: series, parallel, combined. The main research method is computer simulation. The Scilab software environment was used to simulate the operation of the electric energy storage system. **Findings.** The relevance of the research and development of a primary electric energy storage system using a traction photovoltaic module has been proved. The key mathematical dependencies between the parameters of the constituent elements of electrical circuits are established. The structure of a site with electric energy storage with traction photovoltaic modules and a converter-pulse signal unit is proposed. The graphical characteristics of transient processes that occurred during the transfer of energy from low-power capacitive elements to a high-power capacitive element (traction capacitor) were obtained. **Originality.** For the first time, graphical dependences of energy transfer between system elements were obtained, which allows for a reasonable choice of the parameters of these elements. Also, for the first time, time dependencies describing the law of control of the process of energy transfer between system links were obtained, which will allow

determining the rational modes of its operation. **Practical value.** The results of the research open up new opportunities in the research field in the development of large-scale experimental models of the maglev path structure in the case of the introduction of a system of distributed primary energy storage in a traction photovoltaic module.

*Keywords:* photovoltaic module; traction capacitor; magnetolevitation transport; path structure; transients; computer modeling

## REFERENCES

1. Dzenzerskiy, V. O., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Y. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress*, 1(73), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Russian)
2. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*, 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
3. Plaksin, S. V., Mukha, A. M., Ustymenko, D. V., Zhytnyk, M. Y., Levchenko, R. Y., Chupryna, Y. M., & Holota, O. O. (2021). Method of Operational Control and Management of Electrochemical Energy Storage Device in the Systems of Electricity Supply of Vehicles. *Science and Transport Progress*, 6(96), 39-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258172> (in Ukrainian)
4. Moschoudis, A. P., Tsekouras, G. J., Kanellos, F. D., & Kladas, A. G. (2016). Particular SRM Design Methodology Based on Similarity Theory, Scale Factors and FEM. *Materials Science Forum*, 856, 269-275. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.856.269> (in English)
5. Esteban, E., Salgado, O., Iturrospe, A., & Isasa, I. (2017). Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis. *Mechatronics*, 47, 14-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005> (in English)
6. Harvey, J. T. (2004). Complex Systems Theory and Development Practice. *Journal of Economic Issues*, 38(3), 861-862. DOI: <https://doi.org/10.1080/00213624.2004.11506738> (in English)
7. Jafaryar, M., & Sheikholeslami, M. (2022). Efficacy of magnetic field on performance of photovoltaic solar system utilizing ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 562, 169798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169798> (in English)
8. Covaci, M.-A., Gălătuș, R. V., Petreuş, D. M., & Szolga, L. A. (2023). Renewability and Robustness Analysis and Review for Sustainable-Technology Propulsion Systems in Modern Transportation Infrastructure Administration. *Applied Sciences*, 13(24), 1-37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132413026> (in English)
9. Novas, N., Garcia, R. M., Camacho, J. M., & Alcayde, A. (2021). Advances in Solar Energy towards Efficient and Sustainable Energy. *Sustainability*, 13(11), 1-31. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116295> (in English)
10. Ramireddy, V. (2012). Innovative Approach to Maglev Trains (Solar Energy). *Electrical Engineering Portal*. Retrieved from <https://electrical-engineering-portal.com/innovative-approach-to-maglev-trains-solar-energy> (in English)
11. Wiesman, R., Fontana, R., Cope, D., & Gamble, B. (1995). Design and Demonstration of a Locally Commutated Linear Synchronous Motor. *SAE Transactions*, 104, 59-65. DOI: <https://doi.org/10.4271/951919> (in English)
12. Qadir, Z., Munir, A., Ashfaq, T., Munawar, H. S., Khan, M. A., & Le, K. (2021). A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.05.2024

Прийнята до друку: 23.09.2024

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.738.1-047.44

О. В. ГОРБОВА<sup>1</sup>, Д. В. БОГУЦЬКИЙ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 195 52 56, ел. пошта bohutskiy2@gmail.com, ORCID 0009-0003-3854-8637

## Контекстний аналіз сайту

**Мета.** У статті передбачено описати метод контекстного дослідження вебсайтів, який є альтернативою традиційним еталонним тестам. На відміну від лабораторних досліджень, де умови суворо контролюють, контекстне дослідження дозволяє оцінити зручність використання вебсайту в реальному контексті, враховуючи фактори, що впливають на користувача в його звичному середовищі. Це означає, що дослідники спостерігають за користувачами, які взаємодіють із вебсайтом у їхньому природному оточенні, наприклад, удома або на роботі, що дозволяє отримати більш релевантне розуміння користувацького досвіду.

**Методика.** Використано метод контекстного дослідження, який передбачає детальне спостереження та опитування невеликої групи користувачів щодо певних аспектів вебсайту. Це допомагає отримати реальне уявлення про те, як користувач сприймає та використовує сайт у реальних умовах, у контексті вебсайтів. Дослідники можуть спостерігати за тим, як користувачі використовують вебсайт, які завдання вони намагаються виконати, із якими труднощами вони стикаються та як вони взаємодіють з іншими інструментами та програмами. **Результати.** Дослідження дозволяє значною мірою спростити оцінку зручності вебсайту за допомогою визначених підходів та розробленого програмного забезпечення. Завдяки використанню контекстного дослідження можна виявити недоліки, які не були б помітні під час лабораторних тестів, та запропонувати поліпшення, що підвищують зручність використання вебсайту. **Наукова новизна.** Дослідження базується на ключових принципах, таких як врахування контексту, спільна оцінка, зручність як головний показник, фокус на предметі дослідження. Це дозволяє отримати більш глибоке розуміння того, як користувачі взаємодіють із вебсайтом у реальних умовах, а не лише в штучно створеному лабораторному середовищі. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють використовувати метод контекстних досліджень у широкій сфері людської діяльності в рамках вебсайтів за різною їх спрямованістю для поліпшення користувацького досвіду. Це може бути особливо корисно для вебсайтів, які розробляють для певних груп користувачів, таких як люди з обмеженими можливостями або літні люди.

*Ключові слова:* software; контекстне дослідження; користувач; метод; розробник; вебсайт

## Вступ

Успіх у сучасному інтернет-середовищі неможливий без постійного вдосконалення контенту. Хоча існує багато інструментів для аналізу поведінки користувачів на сайті, бракує рішень, які б комплексно оцінювали зручність і доцільність програмного продукту, з урахуванням як можливості розробників, так і потреб користувачів.

Цей розрив між технічними можливостями та реальними потребами користувачів становить значні перешкоди для створення насправді цінного програмного забезпечення, коли відстеження шляху клієнта (у рамках продукту) може дати важливу інформацію, яку без цього важко було б зрозуміти, уже наявні на сьогодні дослідження, які здатні створити фреймворк, який використовує найсучасніші технології штучного інтелекту, щоб запропонувати відпо-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

відним розробникам сформувати найкращу команду для вирішення програмних проєктів зі специфічними характеристиками та вимогами, і який має перспективи, хоч і не без обмежень – за допомогою онтології та семантичного опису [10].

Стрімкий розвиток інформаційних технологій робить критично важливим ефективний зворотній зв'язок між розробниками та користувачами. Тільки тісна співпраця дозволяє створювати актуальний функціонал, що відповідає реальним потребам користувачів, оптимізуючи використання ресурсів та часу.

Визначення реальних потреб користувачів: замість опитування про їхні потреби краще застосувати метод контекстних досліджень, який дозволяє спостерігати за користувачами в їхньому природному середовищі, виявляючи їхні реальні важливі потреби та проблеми, які вони самі можуть не усвідомлювати. Навіть у рамках однорідної цільової аудиторії, наприклад, користувачів однієї вікової групи з подібними завданнями, не існує універсального підходу до розробки програмного забезпечення. Кожна людина має унікальний набір характеристик, переваг та очікувань, які впливають на її взаємодію з програмним продуктом. Ці різноманітні характеристики, які ми називаємо «людськими аспектами», повинні бути враховані на всіх етапах розробки програмного забезпечення. Ігнорування людських аспектів може призвести до серйозних негативних наслідків: від економічних втрат та неефективності до створення небезпечних або навіть загрозливих для життя ситуацій. Адже програмне забезпечення, створене без урахування потреб і очікувань користувачів, приречене на провал [12].

### Мета

Дослідження покликане проаналізувати, як метод контекстних досліджень допомагає поліпшити якість розробки програмного забезпечення. Зокрема передбачено дослідити його роль у налагодженні ефективної взаємодії між користувачами та розробниками, а також у визначенні чітких цілей розробки, орієнтованих на задоволення потреб користувачів. Метод має потенційно широкі можливості для використання, у тому числі як для написання якісної та

зрозумілої документації, так і системно-структурного підходу до формування принципів звітності [3].

Оскільки контекстне дослідження – це досить новий напрям, що не має широкого застосування, особливо у вебсфері, список використання на практиці або відсутній, або носить мінімальний характер і не охоплює всі можливості та переваги, які надає метод.

Метод контекстних досліджень є одним із ключових методів оцінки зручності вебсайтів (web usability methods), поряд із такими відомими техніками, як сортування карток, чеклисти, прототипування, опитування, спільні огляди, аналіз логів, протокол «голосних думок», фокус-групи, евристична оцінка та інспекція функцій. Сучасна IT-індустрія, за даними опитування та дослідження угорських компаній, ставить перед розробниками програмного забезпечення все більш високі вимоги. Сьогодні недостатньо створювати продукти, які просто виконують свій основний функціонал. На передній план виходять такі характеристики, як узгодженість, висока якість, ефективність та зручність використання. Причому якщо деякі з цих характеристик (наприклад, функціональна придатність, надійність) більше хвилюють розробників, то інші (ефективність, продуктивність та зручність) мають першорядне значення для користувачів [13]. Глобальна мережа інтернет динамічно розвивається, постійно адаптується до потреб користувачів, чисельність яких невідомо зростає. Уже у 2021 році понад половину населення планети – а це 4,66 мільярда людей – мало доступ до інтернету [4].

Основні принципи контекстуального дослідження – це фокус та контекст, як основні концепції, що визначають підхід і реалізацію методу дослідження [8]. Фокус і контекст – важливі концепції в проєктуванні вебсайтів, що надзвичайно актуально. Про стрімке зростання кількості інтернет-користувачів свідчать дані компанії «We Are Social»: щоденно з липня 2018 року близько 900 000 людей уперше отримують доступ до глобальної мережі. Наочно цю тенденцію демонструє діаграма (рис. 1), де для порівняння наведено частку інтернет-користувачів у 2018 році – 46,8 % населення планети.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

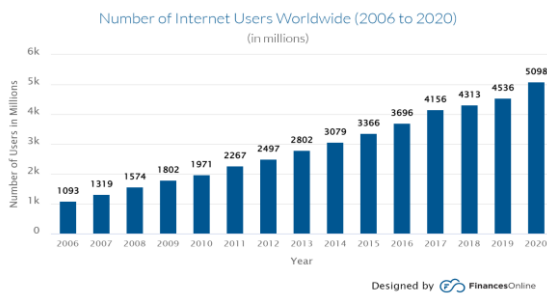


Рис. 1. Діаграма щорічного зростання кількості користувачів мережі інтернет

Fig. 1. Diagram of annual growth in the number of Internet users

### Методика

Хороше дослідження – це коли ви ставите більше запитань і критично осмислюєте відповіді. Добре виконане дослідження заощадить вашій команді час і гроші, зменшивши кількість невідомих і створивши міцний фундамент для побудови правильних речей у найефективніший спосіб [5]. Також контекстний підхід часто задіяний під час обговорень того, як працює інтернет на загальних вебінарах та лекціях [8].

Дослідження передбачає комплексну оцінку продукту з точки зору як інтерфейсу (наскільки він лаконічний та зрозумілий), так і функціональності (чи відповідає продукт потребам користувачів) [6]. Це комплексна та складна задача, оскільки не існує єдиного визначення задоволеності користувачького досвіду, і перед UX-дизайнерами постає питання, як зробити взаємодію з послугою або продуктом інтуїтивною плавною та задоволеною [8].

«Сортування карток» (Card Sorting) – метод дослідження, у якому користувачі розподіляють картки з назвами об'єктів за групами, демонструючи власне розуміння структури та зв'язків між елементами. Розрізняють відкрите сортування (користувачі самі створюють назви для груп), закрите (назви груп визначені заздалегідь) та зворотнє сортування (користувачі шукають картки, що відповідають заданим завданням, переміщуючись по ієрархії). Відкрите сортування допомагає зрозуміти, як користувачі класифікують інформацію, закрите – перевірити зрозумілість наявної структури, а зворотнє – оцінити зручність навігації.

Метод «спостереження» (Observation) базується на аналізі поведінки людей та інших об'єктів із метою виявлення закономірностей. Цей метод вимагає від дослідника досвіду та обережності, особливо в нових для нього сферах. Сучасні технології дозволяють значно розширити цей процес, наприклад, за допомогою доповненої реальності, так званого «віртуального спостереження» – програмного інструменту для контекстного спостереження та оцінки користувача безпосередньо з рамок симуляції віртуальної реальності [7].

«Прототипування» (Prototyping) передбачає створення спрощеної версії продукту – від схематичних зображень до інтерактивних макетів. Мета прототипування – візуалізувати ідеї, отримати відгуки користувачів на ранніх етапах розробки та оцінити їх сприйняття.

Контекстуальний запит має на меті допомогти в розумінні дій та ходу мислення користувачів, основної структури їх діяльності і не має значної ефективності для цільових задач планування. Дослідження довели, що форуми програмних продуктів можуть бути цінним джерелом контекстної інформації, здатної поліпшити процес розробки. Зокрема, із високою ймовірністю (0,75 для зв'язку між помилками та реченнями про використання і 0,69 для виявлення ідей щодо поліпшення продукту) на форумах можна знайти дані, які допоможуть розробникам краще зрозуміти та виправити проблеми з програмним забезпеченням, а також знайти нові ідеї для його вдосконалення. Використання такої інформації дозволить суттєво скоротити час та зусилля, які витрачають на пошук необхідного контексту [15].

Контекстне дослідження зосереджується на спостереженні за невеликою групою респондентів у їхньому природному середовищі – удома, на роботі чи в інших місцях, де вони звикли використовувати досліджуваний продукт. Можливі шляхи для гейміфікації процесу. Так, наприклад, Waiden – експериментальна гра, яка виходить за межі традиційної ігрової механіки, щоб заохочувати уважну гру. За допомогою напівструктурованих інтерв'ю та контекстних запитальних сесій уголос це феноменологічне дослідження порівнює досвід користувачів із цими двома програмами. Результати містять опис того, як учасники відчували усвідомле-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ність як споглядальну саморефлексію, як довготривалий процес, як побічний продукт гри і як напругу між дослідженням і виконанням завдань [11]. Метод є актуальним із точки зору сьогодення та інформаційного простору, окрім цього, його використовують як нові підходи до навчання контекстних ланцюгових моделей Маркова [2].

*Аналіз читабельності.* Читабельність – один із ключових факторів успішного просування вебсторінки. Перевантаженість тексту та складний дизайн погіршують сприйняття інформації, що знижує ефективність просування сайту та відштовхує користувачів. Важливо знаходити баланс між інформативністю та лаконічністю, робити контент легким для читання. Більшість користувачів обмежені в часі, тому хочуть швидко знаходити потрібну інформацію. Дослідження показують, що оптимальна довжина рядка для вебконтенту становить 45–80 символів – це залежить від використаного шрифту.

*Аналіз структурних тегів.* Семантичні теги допомагають браузерам та розробникам чітко розуміти структуру та зміст вебдокумента. Хоча ці теги не обов'язкові для відображення сторінки, їх використання рекомендоване, оскільки пошукові системи позитивніше оцінюють сторінки з чіткою семантичною структурою. Семантичний аналіз (семантичне SEO) спрямований на підвищення релевантності пошукової видачі шляхом аналізу контексту пошукових запитів.

*Проектування та розробка інструменту.* Під час проектування програмного забезпечення важливо дотримуватись принципу модульності та поділу на компоненти з чітко визначеними функціями. Згідно з принципом єдиної відповідальності (SOLID), кожен клас повинен виконувати лише одну конкретну дію, що спрощує розробку, тестування та підтримку програмного забезпечення.

Інструмент має тривірневу архітектуру: клієнтська частина, серверна частина та модулі аналізу.

Клієнтська частина забезпечує інтерфейс для користувача: завантаження HTML-документа, відображення форми та результатів аналізу.

Серверна частина відповідає за обробку запитів від клієнта, запуск необхідних бібліотек та модулів аналізу, а також формування відповідей.

Кожен модуль аналізу працює незалежно, отримуючи HTML-документ від сервера, виконуючи певний тип аналізу та повертаючи результати на сервер. Основним елементом на сторінці виступає кругова діаграма, яка дозволяє візуалізувати отримані дані для кращого сприйняття. Кожна діаграма відповідає за окремий модуль, через який проходить аналіз переданого на сервер файлу [1]. Візуалізацію можна побачити на рис. 2.

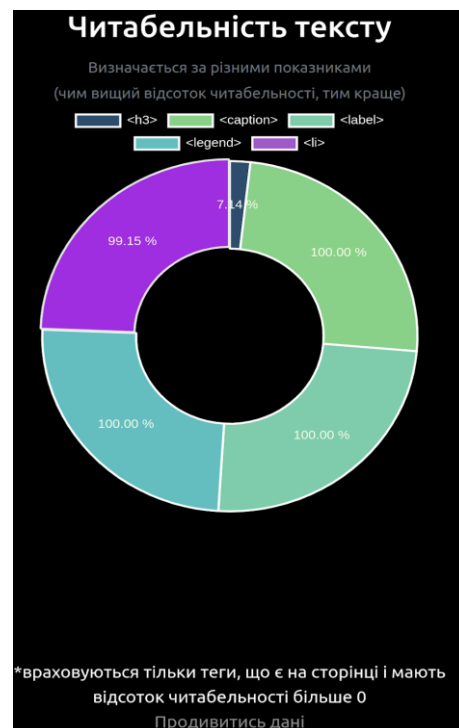


Рис. 2. Діаграма читабельності

Fig. 2. Readability chart

Для детального ознайомлення з результатами аналізу передбачена можливість перегляду даних кожного модуля. Натиснувши на посилання «Продивитись дані», користувач відкриває модальне вікно з детальною інформацією, представленою у вигляді інтерактивного дерева. Розкриваючи вузли дерева, можна переглянути конкретні дані, на основі яких побудована кругова діаграма для цього модуля. Наприклад, обравши модуль читабельності тексту, користувач отримує інформацію про коефіцієнт чи-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

табельності для кожного аналізованого тегу. Звісно, конкретний набір даних залежить від функціональності обраного модуля. На рис. 3 зображено приклад такого модального вікна.

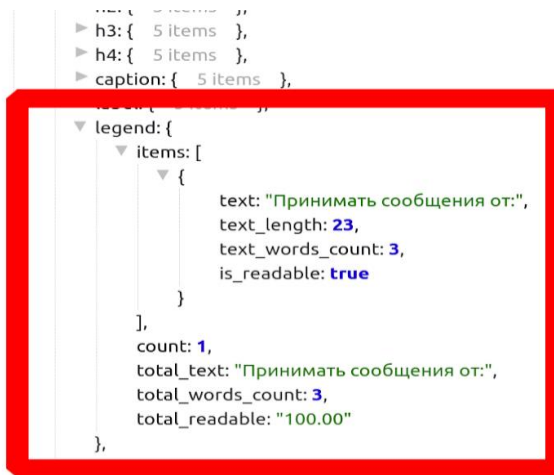


Рис. 3. Екранна форма перегляду даних за тегом

Fig. 3. Screen form for viewing data by tag

### Результати

Експериментальні дослідження показали ефективність текстового модуля контекстного аналізу для оцінки читабельності тегів та їх словесного наповнення. Це особливо корисно для SEO-оптимізації. Семантичний аналіз тегів також виявився ефективним інструментом. Він дозволяє оцінити якість використання тегів для пошукової оптимізації та перевірити структуру сторінки. Це спрощує навігацію за подальшого вдосконалення кодової бази та сприяє поліпшенню загальної ефективності вебресурсу.

Результати текстового аналізу читабельності сторінки показали, що найбільший відсоток серед всіх сторінок в експерименті читабельності зосереджений на підписах та елементах списку. Близькі до середніх результати читабельності мають заголовки третього рівня. Найменший відсоток читабельності зосереджений у рядкових елементах, але вони розміщені лише на одній сторінці.

Результати семантичного аналізу, який полягав у кількісній оцінці використання семантичних тегів, показали, що найчастіше зустрічаються теги, пов'язані з часовими позначками, розділенням сторінки на секції, а також теги, що визначають основний зміст сторінки (верх-

ній та нижній колонтитули). Найменш розповсюдженими виявились теги, які використовують для позначення внутрішнього змісту сторінки та бокової панелі.

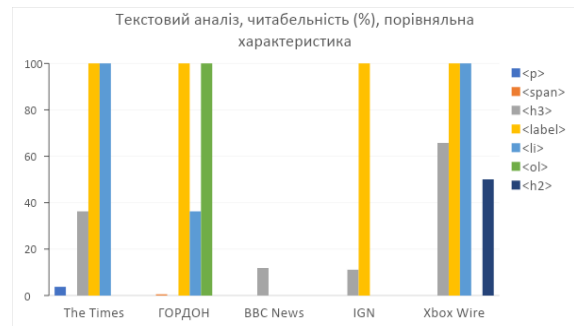


Рис. 4. Графік читабельності тегів

Fig. 4. Graph of tag readability

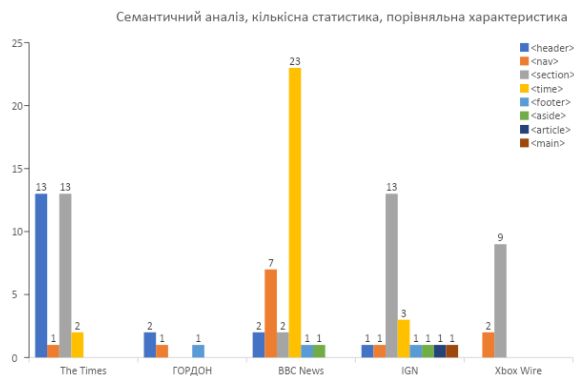


Рис. 5. Графік кількості семантичних тегів

Fig. 5. Graph of the number of semantic tags

### Наукова новизна та практична значимість

Основний метод контекстних досліджень має особливу актуальність для сфери веброзробки, де успіх продукту безпосередньо залежить від його відповідності потребам та очікуванням користувачів. На відміну від інших методів, контекстні дослідження дозволяють врахувати не лише вподобання користувачів щодо інтерфейсу, логіки та поведінки сайту, але й можливості та обмеження, з якими стикаються розробники. Такий підхід сприяє створенню вебсайтів, що є однаково зручними, функціональними та ефективними.

Метод має значну кількість переваг, як, наприклад, розкриття інформації та даних, яких об'єкт або людина не подає про себе, спосте-

реження дає більш детальну інформацію, на відміну від інших видів досліджень, його можна використовувати всюди. Так, наприклад, за допомогою контексту можна дослідити миттєві повідомлення завдяки опитуванню та повсякденному спілкуванню користувачів у месенджерах [15].

### Висновки

Експериментальне використання розробленого інструменту підтвердило ефективність контекстного аналізу для оцінки та поліпшення

вебсторінок. Зокрема, текстовий модуль дозволив ефективно виявляти проблемні теги з точки зору читабельності та SEO-оптимізації завдяки аналізу кількості слів у тегах. Семантичний аналіз також продемонстрував практичну цінність, надаючи користувачам інформацію про рівень SEO-оптимізації сторінки, а розробникам – інструмент для аналізу та вдосконалення продукту.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богуцький Д. В. *Контекстне дослідження Web-сайту* : дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра. Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2022. 186 с.
2. Bar A., Shapira B., Rokach L. Context aware Markov chains models. *Knowledge-Based Systems*. 2023. Vol. 282. Article 111083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.111083>
3. Derun I., Mysaka H., Skliaruk I. Contextual research of strategic theories for non-financial reporting: A system-structural approach to formulating reporting principles. *Scientific Papers of the University of Pardubice, Series D: Faculty of Economics and Administration*. 2023. Vol. 31. Iss. 1. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.46585/sp31011644>
4. Geary T. M. Contextual inquiry. *Keywords in Design Thinking: A Lexical Primer for Technical Communicators & Designers*. 2022. P. 63–66. DOI: <https://doi.org/10.37514/tpc-b.2022.1725.2.10>
5. Hall E. *Just enough research: Second edition*. Mule Design, 2019. 198 p.
6. Henderson J. Contextual inquiry: A comprehensive guide. *UserTesting*. 2024. URL: <https://www.usertesting.com/blog/contextual-inquiry>
7. Howie S., Gilardi M. Virtual observations: A software tool for contextual observation and assessment of user's actions in virtual reality. *Virtual Reality*. 2021. Vol. 25. Iss. 2. P. 447–460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00463-5>
8. Kuby C. R., Bozalek V. Post philosophies and the doing of inquiry: Webinars and WEBing sessions become a special issue(s). *Qualitative Inquiry*. 2023. Vol. 29. Iss. 1. P. 3–6. DOI: <https://doi.org/10.1177/10778004221122288>
9. Lee H.-P. H., Chiang Y.-S., Chou Y.-L., Lin K.-P., Chang Y.-J. What makes IM users (un)responsive: An empirical investigation for understanding IM responsiveness. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023. Vol. 172. Article 102983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102983>
10. Rodríguez-García M. Á., García-Sánchez F., Valencia-García R. Smart recommender for the configuration of software project development teams. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 258. Article 125141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125141>
11. Saleh K., Shukairy A. *Conversion optimization: The art and science of converting prospects to customers*. Packt Publishing, 2015. 268 p.
12. Singh H., Khalajzadeh H., Paktinat S., Graetsch U. M., Grundy J. Modelling human-centric aspects of end-users with iStar. *Journal of Computer Languages*. 2022. Vol. 68. Article 101091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cola.2022.101091>
13. Szabó B., Hercegi K. User-centered approaches in software development processes: Qualitative research into the practice of Hungarian companies. *Journal of Software: Evolution and Process*. 2023. Vol. 35. Iss. 2. P. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.1002/smr.2501> (in English)
14. User Experience (UX) Design. *Interaction Design Foundation*. 2024. URL: <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ux-design>
15. Wang H., Devine P., Tizard J., Shahamiri S. R., Blincoe K. Conversation in forums: How software forum posts discuss potential development insights. *Journal of Systems and Software*. 2024. Vol. 215. Article 112108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112108>

A. V. GORBOVA<sup>1</sup>, D. V. BOHUTSKYI<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

<sup>2\*</sup>Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 52 56, e-mail bohutskiy2@gmail.com, ORCID 0009-0003-3854-8637

## Contextual Analysis of the Site

**Purpose.** The purpose of this article is to describe the method of contextual website research, which is an alternative to traditional benchmark tests. Unlike laboratory tests, where conditions are strictly controlled, contextual research allows you to evaluate the usability of a website in a real context, taking into account the factors that affect the user in his or her usual environment. This means that researchers observe users interacting with a website in their natural environment, such as at home or at work, which allows them to gain a more relevant understanding of the user experience. **Methodology.** We used the contextual research method, which involves detailed observation and interviewing a small group of users about certain aspects of a website. This helps to get a realistic picture of how the user perceives and uses the site in real conditions, in the context of websites. Researchers can observe how users use the website, what tasks they are trying to accomplish, what difficulties they encounter, and how they interact with other tools and programs. **Findings.** The study makes it possible to greatly simplify the evaluation of website usability using certain approaches and developed software. Using contextual research, it is possible to identify shortcomings that would not be noticeable during laboratory tests and suggest improvements that increase the usability of a website. **Originality.** The study is based on key principles such as contextualization, collaborative evaluation, usability as the main indicator, and focus on the subject matter. This allows us to gain a deeper understanding of how users interact with a website in real life, not just in an artificially created laboratory environment. **Practical value.** The results of the work allow us to use the method of contextual research in a wide range of human activities within websites of different orientations to improve the user experience. This can be especially useful for websites that are developed for certain groups of users, such as people with disabilities or the elderly.

*Keywords:* software; contextual research; user; method; developer; website

## REFERENCES

1. Bogutskiy, D. (2022). *Contextual inquiry of a website*: Master's thesis in Software Engineering. Ukrainian State University of Science and Technology. Dnipro. (in Ukrainian)
2. Bar, A., Shapira, B., & Rokach, L. (2023). Context aware Markov chains models. *Knowledge-Based Systems*, 282, 111083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.111083> (in English)
3. Derun, I., Mysaka, H., & Skliaruk, I. (2023). Contextual Research of Strategic Theories for Non-financial Reporting: A System-Structural Approach to Formulating Reporting Principles. *Scientific Papers of the University of Pardubice, Series D: Faculty of Economics and Administration*, 31(1), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.46585/sp31011644> (in English)
4. Geary, T. M. (2022). Contextual Inquiry. *Keywords in Design Thinking: A Lexical Primer for Technical Communicators & Designers*, 63-66. DOI: <https://doi.org/10.37514/tpc-b.2022.1725.2.10> (in English)
5. Hall, E. (2021). *Just enough research: Second edition*. Mule Design. (in English)
6. Henderson, J. (2024, April 18). Contextual inquiry: A comprehensive guide. *UserTesting*. Retrieved from <https://www.usertesting.com/blog/contextual-inquiry> (in English)
7. Howie, S., & Gilardi, M. (2020). Virtual Observations: a software tool for contextual observation and assessment of user's actions in virtual reality. *Virtual Reality*, 25(2), 447-460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00463-5> (in English)
8. Kuby, C. R., & Bozalek, V. (2022). Post Philosophies and the Doing of Inquiry: Webinars and WEBing Sessions Become a Special Issue(s). *Qualitative Inquiry*, 29(1), 3-6. DOI: <https://doi.org/10.1177/10778004221122288> (in English)
9. Lee, H.-P. (Hank), Chiang, Y.-S., Chou, Y.-L., Lin, K.-P., & Chang, Y.-J. (2023). What makes IM users (un)responsive: An empirical investigation for understanding IM responsiveness. *International Journal of Human-Computer Studies*, 172, 102983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102983> (in English)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

10. Rodríguez-García, M. Á., García-Sánchez, F., & Valencia-García, R. (2024). Smart recommender for the configuration of software project development teams. *Expert Systems with Applications*, 258, 125141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125141> (in English)
11. Saleh, K., & Shukairy, A. (2015). *Conversion optimization: The art and science of converting prospects to customers*. Packt Publishing. (in English)
12. Singh, H., Khalajzadeh, H., Paktinat, S., Graetsch, U. M., & Grundy, J. (2022). Modelling human-centric aspects of end-users with iStar. *Journal of Computer Languages*, 68, 101091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cola.2022.101091> (in English)
13. Szabó, B., & Hercegi, K. (2022). User-centered approaches in software development processes: Qualitative research into the practice of Hungarian companies. *Journal of Software: Evolution and Process*, 35(2), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1002/smr.2501> (in English)
14. User Experience (UX) Design. (2024, March 12). *Interaction Design Foundation*. Retrieved from <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ux-design> (in English)
15. Wang, H., Devine, P., Tizard, J., Shahamiri, S. R., & Blincoe, K. (2024). Conversation in forums: How software forum posts discuss potential development insights. *Journal of Systems and Software*, 215, 112108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112108> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.05.2024

Прийнята до друку: 30.09.2024

# МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.867.33

В. М. БОГОМАЗ<sup>1\*</sup>, В. Й. НАГАЧЕВСЬКИЙ<sup>2</sup>, М. В. ПРИЙМАК<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 472 14 04, ел. пошта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

<sup>2</sup>Каф. інженерної техніки, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, вул. Героїв Майдану, 32, Львів, Україна, 79012, тел. +38 (067) 790 79 28, ел. пошта slavik.inaq@gmail.com, ORCID 0000-0003-3362-5210

<sup>3</sup>Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 478 65 16, ел. пошта m.v.pryimak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4885-1931

## Аналіз впливу параметрів експлуатації машин на технічні характеристики елеватора в пункті чищення та миття парку техніки

**Мета.** Дослідження спрямовано на визначення характеру впливу параметрів експлуатації машин підприємства (кількості гусеничних та колісних машин, річних норм витрати їх моторесурсів) на технічні характеристики елеватора для очищення брудовідстійника пункту чищення та миття парку техніки, зокрема висоту елеватора та його продуктивність, а також побудову аналітичних та графічних залежностей зазначених величин від параметрів експлуатації техніки. **Методика.** Для досягнення мети використано алгоритми розрахунків, представлені в сучасній технічній літературі, та проведено аналіз факторів і величин, які впливають на значення висоти та продуктивності елеватора пункту. Установлено, що для визначення проектних параметрів елеватора необхідно мати статистичні дані щодо експлуатації техніки на підприємстві та провести детальний розрахунок, який передбачає: математичне очікування середньодобової кількості машиновиходів із парку для різних типів техніки, а також сумарне значення, кількість номерних обслуговувань машин, кількість постів зовнішнього миття машин, геометричні параметри брудовідстійника. **Результати.** Для елеватора пункту чищення та миття парку машин конкретного підприємства, який призначено для очищення брудовідстійника, проведено графічний аналіз впливу кількості гусеничних та колісних машин та їх річних норм витрат моторесурсів на величину його висоти та продуктивності. Установлено, що функції зміни продуктивності та висоти є лінійними зростаючими (за фіксованих інших параметрів). **Наукова новизна.** Авторі вперше дослідили залежності проектних параметрів (висоти та продуктивності) елеватора, побудували аналітичні залежності математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для колісної та гусеничної техніки від кількості відповідних машин та річних норм витрат моторесурсів, а також висоти та продуктивності елеватора. Для прикладів парків підприємств із параметрами експлуатації техніки, узятими зі статистичних даних, проведено графічний аналіз побудованих залежностей. **Практична значимість.** Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер та діапазон зміни вищезазначених проектних параметрів у разі варіювання показників експлуатації техніки на конкретному підприємстві. Запропоновані залежності можуть бути використані для швидкого визначення необхідних проектних параметрів елеватора за конкретних даних з експлуатації техніки.

*Ключові слова:* парк техніки; пункт чищення та миття; транспортер; продуктивність; висота; моторесурс

## Вступ

В умовах сьогодення велика кількість промислових та транспортних підприємств задіяна в ліквідації наслідків обстрілу критичної та транспортної інфраструктури України. Для цього підприємства залучають значну кількість автомобільної та інженерної техніки. Щоб забезпечити її правильну експлуатацію та підтримувати у справному та працездатному стані, організують та проводять технічне обслуговування.

Однією зі складових усіх видів технічного обслуговування техніки є операція миття, для виконання якої в парках техніки передбачено пункт чищення та миття. Він призначений для проведення прибирально-мийних робіт техніки, яка повернулась у парк. Будова різних парків машин та методика їх розрахунку детально описана в джерелах [7, 8].

У разі інтенсивного використання наявної техніки, особливо в польових умовах, у брудовідстійнику пункту після миття машин накопичується велика кількість бруду, який необхідно вичищати для подальшої діяльності.

Щоб підвищити пропускну здатність та ефективність роботи, пункт чищення та миття машин обладнують елеватором для очищення брудовідстійника та механізованого навантаження бруду з нього в транспортні засоби для подальшого його вивезення. Схема встановлення такого елеватора зображена на рис. 1.

Основними публікаціями, які описують будову, конструктивні особливості, експлуатаційні та розрахункові параметри сучасних машин безперервного транспорту, до яких належить елеватор, є [1, 4–6, 9–13, 15].

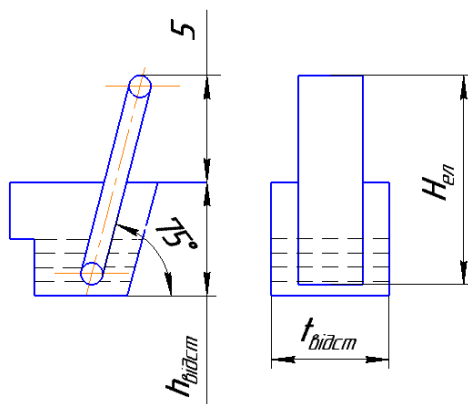


Рис. 1. Схема встановлення елеватора

Fig. 1. Elevator installation diagram

Порядок проведення розрахунків різних типів машин безперервного транспорту детально описано в літературі, зокрема в роботах [4–6]. Але наявні також роботи, у яких описано дослідження, пов'язані з впливом проектних параметрів машин безперервного транспорту на їх технічні характеристики, зокрема потужність приводу та параметри траси транспортування [2, 3, 14].

## Мета

Основною метою роботи є дослідження впливу параметрів експлуатації машин (кількості гусеничних та колісних машин, річних норм витрати їх моторесурсів) на технічні характеристики елеватора для очищення брудовідстійника пункту чищення та миття парку техніки, зокрема на висоту елеватора та його продуктивність, а також побудова аналітичних та графічних залежностей зазначених величин від параметрів експлуатації техніки.

## Методика

Інтенсивність експлуатації техніки на підприємствах має змінний характер залежно від періоду експлуатації, днів тижня і т. ін. Зазвичай для отримання раціональних варіантів елементів парків надзвичайно важливо правильно вибрати розрахунковий період експлуатації. Для цього звертаються до статистичної обробки даних, що характеризують експлуатацію машин підприємства протягом останніх декількох років.

Кількісні значення можуть бути отримані з фактичним виконанням місячних і річних планів експлуатації машин. При цьому місяці з малою інтенсивністю експлуатації до розрахунку не беруть, а більш інтенсивну експлуатацію машин у розрахунках враховують відповідним поправковим коефіцієнтом [8].

Як розрахункові показники інтенсивності експлуатації техніки звичайно беруть реальні статистичні дані від підприємств.

Одним із таких розрахункових показників є математичне очікування витрат моторесурсу однією машиною за один вихід (день). Візьмемо, що він складає:

- для гусеничної інженерної техніки –  $p_T = 5 - 6$  м/г;
- для колісної техніки –  $p_K = 100 - 130$  км.

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Для розрахунку моторесурсів одну годину роботи двигуна під навантаженням беруть рівною:

- 25 км – для машин на автомобільній базі;
- 15 км – для машин на гусеничній базі і на базі колісних тягачів;
- 5 км – для машин на базі гусеничних тракторів.

Основним показником інтенсивності експлуатації техніки є математичне очікування середньодобової кількості машиновиходів із парку підприємства.

Розглянемо методику його визначення, яка детально описана в [8]. Показник обчислюємо за формулою для  $i$ -ої марки машини:

$$N_{Ci} = 1,3 \cdot \frac{N_i \cdot \Phi_i}{12 \cdot 24 \cdot p_i}, \quad (1)$$

де 1,3 – коефіцієнт, що враховує збільшення інтенсивності експлуатації машин у літній період навчання;  $N_{Ci}$  – кількість машин  $i$ -ої марки на підприємстві, шт.;  $\Phi_i$  – річна норма витрати моторесурсу машиною  $i$ -ої марки (м/г); 12 – кількість місяців у році; 24 – розрахункова кількість робочих днів у місяці.

Сумарне математичне очікування середньодобової кількості машиновиходів із парку підприємства для різних видів машин розраховуємо за формулою:

$$N_{Cs} = 1,3 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \Phi_i}{12 \cdot 24 \cdot \sum_{i=1}^n p_i}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість марок машин на підприємстві. Кількість номерних обслуговувань машин ТО–2, проведених за один місяць ( $N_{TO-2}^i$ ), визначаємо за такою залежністю:

$$N_{TO-2}^i = \frac{N_C^i \cdot \Phi_C^i}{12 \cdot T_{TO-2}^i}, \quad (3)$$

де  $T_{TO-2}^i$  – періодичність технічного обслуговування ТО–2 машини  $i$ -ої марки, км (м/г).

Кількість номерних обслуговувань машин ТО–1, проведених за один місяць ( $N_{TO-1}^i$ ), розраховуємо за формулою:

$$N_{TO-1}^i = \frac{N_C^i \cdot \Phi_C^i}{12 \cdot T_{TO-1}^i} - N_{TO-2}^i, \quad (4)$$

де  $T_{TO-1}^i$  – періодичність технічного обслуговування ТО–1 машини  $i$ -ої марки, км (м/г).

Середню кількість щоденних технічних обслуговувань, проведених на підприємстві, визначаємо за формулою:

$$N_{щГО}^i = 24 \cdot N_C^i - (N_{TO-1}^i + N_{TO-2}^i). \quad (5)$$

У пункті чищення та миття техніки можна обладнати декілька постів.

Кількість постів зовнішнього миття машин визначаємо за формулою:

$$X_H = \frac{N_C \cdot t_H}{T_M \cdot \eta_H}, \quad (6)$$

де  $t_H$  – час миття однієї машини у разі шлангового миття і тиску води 0,5–0,6 МПа; для гусеничних машин беремо  $t_{HG} = 40–55$  хв, а для колісних –  $t_{HK} = 20–30$  хв;  $T_M$  – час роботи пунктів попереднього очищення і миття машини протягом доби, хв.; беремо  $T_M = 120–180$  хв;  $\eta_H$  – коефіцієнт використання робочого часу поста миття,  $\eta_H = 0,9–0,95$ .

Для запобігання засміченню водостоків каналізаційної системи і попередження потрапляння нафтопродуктів зі стічними водами в природні чи штучні водойми пости миття обладнують брудовідстійниками і маслоуловлювачами. Принцип дії брудовідстійника і маслобензоуловлювача ґрунтується на різниці в питомій вазі води, бруду і палива (бруд осідає, а масло і паливо спливають).

Для видалення бруду швидкість руху води у водостоках до брудовідстійника повинна бути в межах 4,8–5,6 м/хв. Для забезпечення такої швидкості руху води водостоки роблять з нахилом 3–5°.

Варіант найпростішого брудовідстійника наведено на рис. 2.

Параметри брудовідстійника визначають за умови максимального випадіння часток ґрунту в осад. Для досягнення цієї умови необхідно знизити швидкість руху води у брудовідстійниках до 0,18–0,6 м/хв. Тривалість перебування

## МАШИНОБУДУВАННЯ

води у відстійнику при цьому повинна бути 5–10 хв. Відповідно до цих вимог визначають габаритні розміри відстійника.

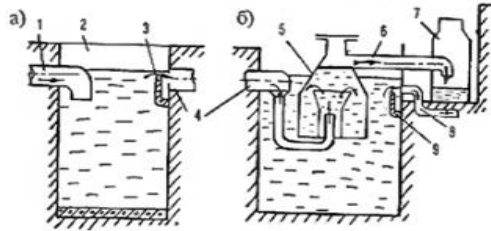


Рис. 2. Схема брудовідстійника з маслобензоуловлювачем:

- a* – брудовідстійник, *b* – маслобензоуловлювач,  
 1 – трубопровід, 2 – ємність, 3 – водозлив,  
 4 – трубопровід, 5 – ковпак, 6 – трубопровід,  
 7 – ємність, 8 – труба зливу, 9 – водозлив

Fig. 2. The scheme of the sludge tank with oil and gas trap:

- a* – dirt sump, *b* – oil and gasoline trap,  
 1 – pipeline, 2 – tank, 3 – spillway,  
 4 – pipeline, 5 – capsule, 6 – pipeline,  
 7 – tank, 8 – drain pipe, 9 – drain

Об'єм осадової частини (глибина) відстійника беруть залежно від періодичності і способів очищення брудовідстійника.

У брудовідстійнику (рис. 2) вода з пункту миття по трубі 1 потрапляє в ємність 2. Зважені і тверді частки, потрапляючи до брудовідстійника, втрачають свою швидкість і осідають на дно. Очищена вода через водозлив 3 стікає по трубі 4 у маслобензоуловлювач під ковпак 5, заповнюючи уловлювач до рівня верхньої кромки водозливу 9, переливаючись через яку, вода тече по трубі 8 у каналізаційну сітку. Масло і бензин унаслідок малої густини (в середньому 0,85) накопичуються у верхній частині ковпака, розміщуючись на рівні, який вищий за рівень води в уловлювачі. Накопичена в горловині ковпака суміш масла і бензину стікає по трубі 6 у ємність 7, яку періодично спорожнюють [8].

Площу поперечного перерізу відстійника визначаємо за формулою:

$$S_{\text{відст}} = \frac{q_{\text{в}} \cdot X_{\text{н}}}{L_{\text{відст}}}, \quad (7)$$

де  $L_{\text{відст}}$  – довжина відстійника, м.

Довжину брудовідстійника обчислюємо за виразом:

$$L_{\text{відст}} = V_{\text{відст}} \cdot T_{\text{відст}}, \quad (8)$$

де  $V_{\text{відст}}$  – швидкість руху води в брудовідстійнику,  $V_{\text{відст}} = 0,18 - 0,6$  м/хв;  $T_{\text{відст}}$  – час перебування води у відстійнику,  $T_{\text{відст}} = 5 - 10$  хв.

Мінімальний об'єм маслобензоуловлювача визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{му}} = 0,5 \cdot \frac{q_{\text{в}} \cdot X_{\text{н}}}{t_{\text{му}}}, \quad (9)$$

де  $Q_{\text{му}}$  – об'єм маслобензоуловлювача, м<sup>3</sup>; 0,5 – дослідний коефіцієнт, що має розмірність, хв;  $t_{\text{му}}$  – час перебування води в маслобензоуловлювачі, хв;  $q_{\text{в}}$  – кількість води, необхідної для миття однієї машини, л.

У розрахунках беруть для миття з двох шлангів, за витрати води через кожен шланг 30–40 л/хв і робочого тиску 0,5–0,6 МПа, загальну витрату на одну гусеничну машину  $q_{\text{в}} = 900 - 1\,600$  л, а на одну колісну машину  $q_{\text{в}} = 600 - 1\,000$  л. У разі душового миття витрата води збільшується для гусеничних машин у 10 разів, а для колісних у 3–4 рази.

Для відділення нафтопродуктів від води необхідно, щоб час перебування води в маслобензоуловлювачі ( $t_{\text{му}}$ ) був не менше 5 хв. Відповідно до цієї вимоги довжину маслобензоуловлювача визначаємо за формулою:

$$L_{\text{му}} = U_{\text{му}} \cdot t_{\text{му}}, \quad (10)$$

де  $L_{\text{му}}$  – довжина маслобензоуловлювача, м;  $U_{\text{му}} = 0,3$  – швидкість руху води в маслобензоуловлювачі, м/хв.

## Результати

Для якісного аналізу впливу параметрів експлуатації машин на технічні характеристики елеватора в пункті чищення та миття парку техніки побудуємо залежність математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів парку техніки та висоти елеватора пункту чищення та миття від кількості машин різного виду та норм витрат моторесурсів для них.

Для подальших досліджень візьмемо можливі діапазони зміни величин для колісних та

## МАШИНОБУДУВАННЯ

гусеничних машин підприємства (для спрощення візьмемо, що для всіх колісних та гусеничних машин різних марок однакові норми):  
 $N_K = 20 \dots 50$ ,  $N_\Gamma = 10 \dots 30$ ,  $p_K = 100$  км,  
 $\Phi_K = 10\,000 \dots 45\,000$  км,  $p_\Gamma = 6$  м/г,  
 $\Phi_\Gamma = 1\,000 \dots 5\,000$  км.

Сумарне математичне очікування середньодобової кількості машиновиходів для гусеничної та колісної техніки обчислюємо за формулою:

$$N_{Cs} = 1,3 \cdot \frac{N_K \cdot \Phi_K}{12 \cdot 24 \cdot p_K} + 1,3 \cdot \frac{N_\Gamma \cdot \Phi_\Gamma}{12 \cdot 24 \cdot p_\Gamma}. \quad (11)$$

Побудуємо графіки залежності математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для гусеничної та колісної техніки від кількості відповідних (колісних або гусеничних) машин та річних норм витрат моторесурсів. Відповідні графіки подано на рис. 3 та 4.

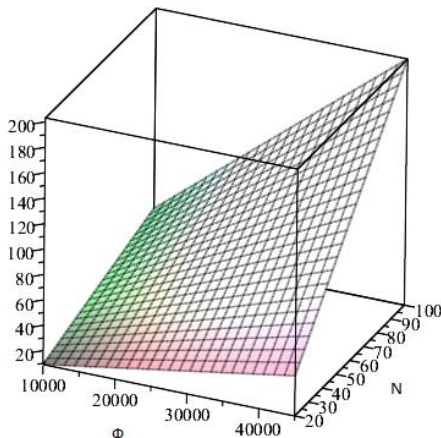


Рис. 3. Графічна залежність математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для колісної техніки від кількості відповідних машин та річних норм витрат моторесурсів

Fig. 3. Graphical dependence of the mathematical expectation of the average daily number of machine outputs for wheeled machinery on the number of relevant machines and the annual rates of consumption of motor resources

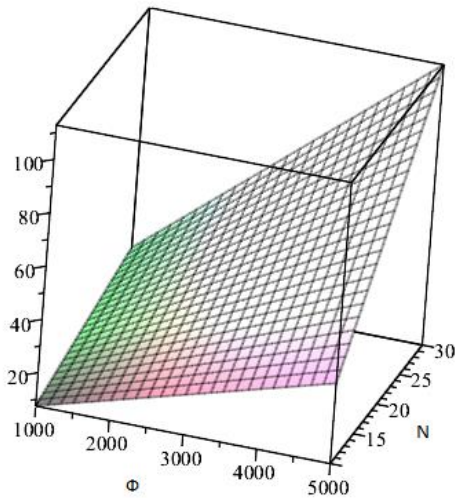


Рис. 4. Графічна залежність математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для гусеничної техніки від кількості відповідних машин та річних норм витрат моторесурсів

Fig. 4. Graphical dependence of the mathematical expectation of the average daily number of machine outputs for tracked machinery on the number of corresponding machines and the annual rates of consumption of motor resources

Ураховуючи припущення  $\Phi_K = 20\,000$  км,  $p_K = 100$  км,  $\Phi_\Gamma = 3\,000$  км,  $p_\Gamma = 6$  м/г, із формули (11) маємо залежність сумарного математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів від кількості гусеничної та колісної техніки:

$$N_{Cs} = 0,9 \cdot N_K + 2,3 \cdot N_\Gamma. \quad (12)$$

Графік залежності математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для гусеничної та колісної техніки від кількості відповідних (колісних або гусеничних) машин подано на рис. 5.

Беремо для подальших розрахунків: для гусеничних машин  $t_{НГ} = 50$  хв, для колісних  $t_{НК} = 30$  хв, а також  $T_M = 180$  хв,  $\eta_H = 0,95$ ,  $V_{відст} = 0,5$  м/хв;  $T_{відст} = 10$  хв.

Підставляючи взяті припущення у (8), маємо:

$$L_{відст} = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ м.}$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Виходячи із (6), за визначених вище припущень маємо залежність для обчислення кількості постів зовнішнього миття машин:

$$X_{\text{НК}} = \frac{N_{\text{СК}} \cdot 30}{180 \cdot 0,9} = 0,19 N_{\text{СК}}; \quad (13)$$

$$X_{\text{НГ}} = \frac{N_{\text{СГ}} \cdot 50}{180 \cdot 0,9} = 0,31 N_{\text{СГ}}. \quad (14)$$

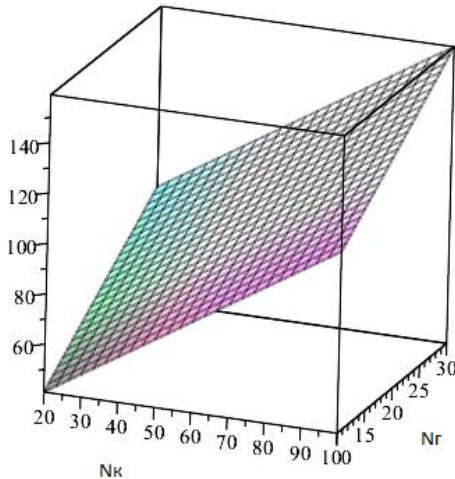


Рис. 5. Графік залежності математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для гусеничної та колісної техніки від кількості відповідних машин

Fig. 5. Graph of the dependence of the mathematical expectation of the average daily number of machine outputs for tracked and wheeled machinery on the number of the corresponding machines

Беремо кількість води, необхідної для миття однієї гусеничної машини,  $q_{\text{вг}} = 1\,200$  л, та колісної –  $q_{\text{вк}} = 800$  л.

Використовуючи (7) та підставляючи в неї (13) і (14), отримаємо залежність площі поперечного перерізу відстійника від кількості машин:

$$S_{\text{відст}} = 0,03 \cdot N_{\text{К}} + 0,074 \cdot N_{\text{Г}}. \quad (15)$$

Підставляючи (12) у (15), маємо:

$$S_{\text{відст}} = 0,027 \cdot N_{\text{К}} + 0,171 \cdot N_{\text{Г}}. \quad (16)$$

Для подальших розрахунків беремо ширину відстійника  $t_{\text{відст}} = 1$  м.

Висоту відстійника розраховуємо за формулою:

$$h_{\text{відст}} = \frac{S_{\text{відст}}}{t_{\text{відст}}}. \quad (17)$$

Отже, підставляючи (16) у (17), маємо:

$$h_{\text{відст}} = 0,027 \cdot N_{\text{К}} + 0,171 \cdot N_{\text{Г}}. \quad (18)$$

Проектну висоту елеватора розраховуємо за формулою:

$$H_{\text{ел}} = 5 + h_{\text{відст}}. \quad (19)$$

Підставляючи (18) у (19), отримаємо залежність висоти елеватора від кількості гусеничної та колісної техніки в парку:

$$H_{\text{ел}} = 5 + 0,027 \cdot N_{\text{К}} + 0,171 \cdot N_{\text{Г}}. \quad (20)$$

Графік залежності висоти елеватора пункту від кількості колісних та гусеничних машин подано на рис. 6.

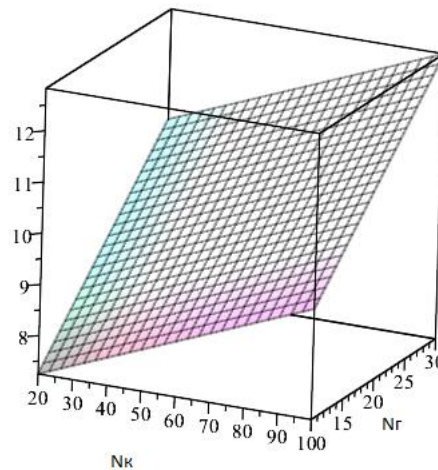


Рис. 6. Графік залежності висоти елеватора пункту від кількості колісних та гусеничних машин

Fig. 6. Graph of the dependence of the height of the elevator on the number of wheeled and tracked vehicles

В умовах сьогодення внаслідок збільшення інтенсивності використання техніки річні витрати моторесурсу машин можуть суттєво варіюватися. Для дослідження залежності висоти елеватора від річних норм витрат моторесурсу гусеничними та колісними машинами беремо:  $N_{\text{К}} = 50$ ,  $N_{\text{Г}} = 20$ .

За таких припущень із формули (2) маємо залежність величини математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів із парку підприємства від річних норм витрат моторесурсів:

## МАШИНОБУДУВАННЯ

$$N_{Cs} = 0,002 \cdot \Phi_K + 0,015 \cdot \Phi_\Gamma. \quad (21)$$

Підставляючи (21) у (7), маємо:

$$S_{\text{відст}} = 0,0006 \cdot \Phi_K + 0,0011 \cdot \Phi_\Gamma. \quad (22)$$

Ураховуючи (22) та (19), маємо:

$$H_{\text{ел}} = 5 + 0,0006 \cdot \Phi_K + 0,011 \cdot \Phi_\Gamma. \quad (23)$$

Графік залежності висоти елеватора пункту від річної витрати моторесурсу машин подано на рис. 7.

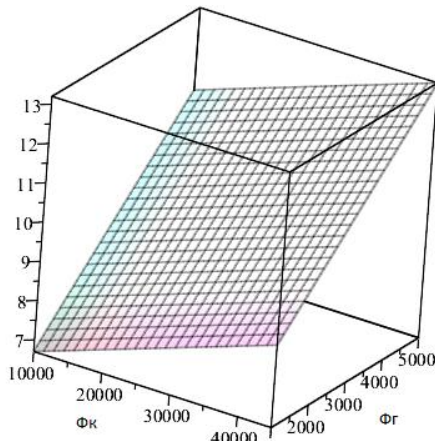


Рис. 7. Залежність висоти елеватора пункту від річних витрат моторесурсу машин

Fig. 7. Dependence of the height of the point elevator on the annual consumption of motor resource of machines

Для подальших досліджень припустимо, що продуктивність має дорівнювати вазі бруду, який з'являється в брудовідстійнику за середньодобовою кількістю виїздів колісної та гусеничної техніки, яку необхідно прибрати за півгодини в кінці робочого дня. Отже, для розрахунку необхідної проектної продуктивності елеватора беремо залежність:

$$P = 2 \cdot \mu_K \cdot \lambda_K \cdot 1,3 \cdot \frac{N_K \cdot \Phi_K}{12 \cdot 24 \cdot p_K} + 2 \cdot \mu_\Gamma \cdot \lambda_\Gamma \cdot 1,3 \cdot \frac{N_\Gamma \cdot \Phi_\Gamma}{12 \cdot 24 \cdot p_\Gamma}, \quad (24)$$

де  $\mu_K$  та  $\mu_\Gamma$  – кількість бруду, який потрапляє до брудовідстійник від однієї колісної та гусеничної машини відповідно, кг;  $\lambda_K$  та  $\lambda_\Gamma$  – коефіцієнт забруднення, який характеризує погод-

ні умови та умови експлуатації для колісної та гусеничної машини відповідно.

Зі статистичних даних експлуатації техніки беремо в середньому  $\mu_K = 50$  кг та  $\mu_\Gamma = 70$  кг.

Значення коефіцієнтів  $\lambda_K$  та  $\lambda_\Gamma$  умовно розділимо на чотири групи залежно від умов експлуатації:

– у сухих умовах та по асфальтній дорозі:  $\lambda_K = 0,2$  та  $\lambda_\Gamma = 0,3$ ;

– у сухих умовах та по ґрунтовій дорозі:  $\lambda_K = 0,5$  та  $\lambda_\Gamma = 0,7$ ;

– у сухих польових умовах:  $\lambda_K = 1$  та  $\lambda_\Gamma = 1,5$ ;

– у вологих польових умовах:  $\lambda_K = 2,5$  та  $\lambda_\Gamma = 3$ .

Ураховуючи вищевикладене, залежність (24) для різних умов експлуатації буде такою:

– у сухих умовах та по асфальтній дорозі:

$$P_1 = 0,16 \cdot \frac{N_K \cdot \Phi_K}{p_K} + 0,19 \cdot \frac{N_\Gamma \cdot \Phi_\Gamma}{p_\Gamma}; \quad (25)$$

– у сухих умовах та по ґрунтовій дорозі:

$$P_2 = 0,4 \cdot \frac{N_K \cdot \Phi_K}{p_K} + 0,44 \cdot \frac{N_\Gamma \cdot \Phi_\Gamma}{p_\Gamma}; \quad (26)$$

– у сухих умовах у полі:

$$P_3 = 0,8 \cdot \frac{N_K \cdot \Phi_K}{p_K} + 0,94 \cdot \frac{N_\Gamma \cdot \Phi_\Gamma}{p_\Gamma}; \quad (27)$$

– у вологих польових умовах:

$$P_4 = 2 \cdot \frac{N_K \cdot \Phi_K}{p_K} + 1,88 \cdot \frac{N_\Gamma \cdot \Phi_\Gamma}{p_\Gamma}. \quad (28)$$

Побудуємо для прикладу залежність необхідної продуктивності елеватора від кількості машин та річних норм витрат моторесурсів у разі роботи у вологих польових умовах.

Візьмемо  $\Phi_K = 20\,000$  км,  $p_K = 100$  км,  $\Phi_\Gamma = 3\,000$  км,  $p_\Gamma = 6$  м/г, із формули (28) маємо залежність продуктивності елеватора від кількості гусеничної та колісної техніки:

$$P_4 = 400 \cdot N_K + 1150 \cdot N_\Gamma. \quad (29)$$

Графік залежності необхідної продуктивності елеватора від кількості колісних та гусеничних машин подано на рис. 8.

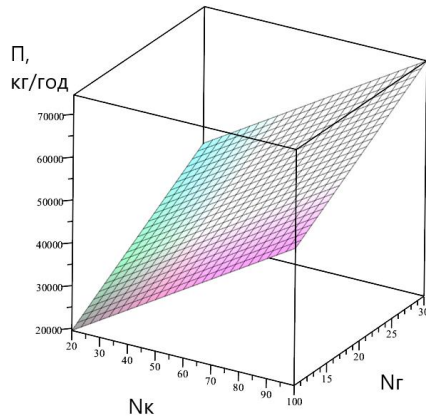


Рис. 8. Графік залежності необхідної продуктивності елеватора від кількості колісних та гусеничних машин

Fig. 8. Graph of the dependence of the required productivity of the elevator on the number of wheels and tracks cars

Для дослідження залежності продуктивності елеватора від річних норм витрати моторесурсу гусеничними та колісними машинами візьмомо:  $N_k = 50$  та  $N_r = 20$ .

Із залежності (28) маємо:

$$P_4 = \Phi_k + 6,3 \cdot \Phi_r. \quad (30)$$

Графік залежності необхідної продуктивності елеватора від річних норм витрат моторесурсів машин подано на рис. 9.

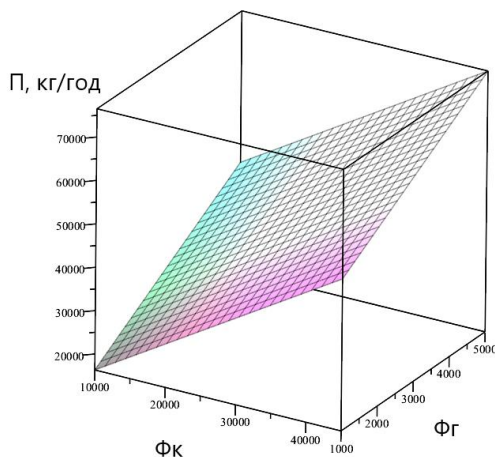


Рис. 9. Графік залежності необхідної продуктивності елеватора від річних витрат моторесурсів машин

Fig. 9. Graph of the dependence of the required productivity of the elevator on the annual cost of motor resources of the machines

### Наукова новизна та практична значимість

Досліджено залежність проектних параметрів (висоти, продуктивності) елеватора для очищення брудовідстійника пункту чищення та миття парку техніки підприємства від параметрів експлуатації машин (кількості гусеничних та колісних машин, річних норм витрати їх моторесурсів). Побудовано аналітичні залежності математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для колісної та гусеничної техніки від кількості відповідних машин та річних норм витрат моторесурсів, а також висоти та продуктивності елеватора. Для прикладів парків підприємств із параметрами експлуатації техніки, узятими зі статистичних даних, проведено графічний аналіз побудованих залежностей.

Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер та діапазон зміни вищезазначених проектних параметрів за варіювання показників експлуатації техніки на конкретному підприємстві. Запропоновані залежності можуть бути використані для швидкого визначення необхідних проектних параметрів елеватора за конкретних даних щодо експлуатації техніки.

### Висновки

Для елеватора пункту чищення та миття парку техніки виконано:

- аналіз сучасної методики розрахунку елементів пункту чищення та миття парку техніки підприємства;
- аналіз величин, які впливають на значення параметрів експлуатації техніки підприємства;
- побудову залежності проектної продуктивності елеватора від параметрів експлуатації техніки для різних умов;
- побудову аналітичної залежності математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для колісної та гусеничної техніки від кількості відповідних машин та їх річних норм витрат моторесурсів;
- побудову аналітичної залежності для визначення висоти та продуктивності елеватора від кількості різних видів техніки та їх річних норм витрат моторесурсів;

## МАШИНОБУДУВАННЯ

– графічний аналіз впливу параметрів експлуатації техніки на значення математичного очікування середньодобової кількості машиновиходів для колісної та гусеничної техніки від кількості відповідних машин та річних норм витрат моторесурсів та проектні параметри елеватора.

Установлено, що функції зміни проектних параметрів елеватора від кількості відповідних машин та річних норм витрат моторесурсів є лінійною зростаючою (за фіксованих інших параметрів).

Для продовження роботи передбачено побудувати алгоритм прискореного розрахунку технічних характеристик елеватора від параметрів експлуатації техніки підприємства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білостоцький В. О., Мазоренко Д. І., Тищенко Л. М., Міняйло А. В. *Атлас конструкцій підйомно-транспортних машин. Частина II. Транспортні машини*. Харків : ХНТУСГ, 2009. 98 с.
2. Богомаз В. М. Аналіз впливу проектних характеристик елеватору на параметри його приводу. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 3 (57). С. 162–175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46076>
3. Богомаз В. М., Анофрієв П. Г. Дослідження впливу проектних параметрів вібраційного конвеєра на його технічні характеристики. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 3 (103). С. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/292718>
4. Бондарев В. С., Дубинець О. І., Колісник М. П., Бондарев С. В., Горбатенко Ю. П., Барабанов В. Я. *Підйомно-транспортні машини: розрахунки підймальних і транспортувальних машин* : підручник. Київ : Вища школа, 2009. 734 с.
5. Дереза О. О. *Машини безперервного транспорту*. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016. 108 с.
6. Іванченко Ф. К. *Підйомно-транспортні машини* : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 413 с.
7. Каленик М. М., Кривцун В. І., Колос О. Л. *Організація експлуатації та ремонту інженерного озброєння* : навчальний посібник. Львів : НАСВ, 2016. 192 с.
8. Каленик М. М., Нанівський Р. А., Гембарський О. С. *Основи проектування парків техніки* : методичний посібник. Львів : НАСВ, 2017. 105 с.
9. *Транспортні системи електромеханічних комплексів* : конспект лекцій / уклад. С. В. Зайченко, В. А. Побігало, В. Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.
10. Al-Kodmany K. Smart Elevator Systems. *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research*. 2023. Vol. 06. Iss. 01. P. 41–54. DOI: <https://doi.org/10.30564/jmmmr.v6i1.5503>
11. Kougawa Y., Omachi A., Iwase S., Sakurai K. Hitachi's core concept for elevator and escalator products and services, and concept model. *Hitachi Review*. Vol. 66. P. 197.
12. March J., Rupe E., Baker R. *Vertical Transportation and Logistics in Mixed-Use High-Rise Towers*. CTBUH : Chicago, IL, USA, 2014. P. 861–865.
13. Marsong S., Plangklang B. Implementation Analysis of an Elevator Energy Regenerative Unit (EERU) For Energy Saving in a Building. *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* (Chiang Mai, 28 June 2016–01 July 2016). Chiang Mai, 2016. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecticon.2016.7561421>
14. Raksha S., Bohomaz V., Shcheka I., Stefanov V., Nesterenko A. Research of the dependence of pneumatic conveyor compressors power on project parameters of transport machines. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001009>
15. Sachs H., Misuriello H., Kwatra S. *Advancing Elevator Energy Efficiency*. American Council for an Energy-Efficient Economy : Washington, DC, USA, 2015. 26 p.

V. M. BOHOMAZ<sup>1\*</sup>, V. J. NAGACHEVSKYI<sup>2</sup>, M. V. PRYIMAK<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 472 14 04, e-mail wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

<sup>2</sup>Dep. of Engineering Equipment, Hetman Petro Sagaidachnyi National Army Academy, Heroes of Maidan Str., 32, Lviv, Ukraine, 79012, tel. +38 (067) 790 79 28, e-mail slavik.inaq@gmail.com, ORCID 0000-0003-3362-5210

<sup>3</sup>Dep. Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 47865 16, e-mail m.v.pryimak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4885-1931

## Analysis of the Influence of Machine Operation Parameters on the Technical Characteristics of the Elevator in the Point of Cleaning and Washing of the Equipment Park

**Purpose.** The study is aimed at determining the nature of the influence of the operating parameters of the enterprise's machines (the number of tracked and wheeled machines, the annual consumption rates of their motor resources) on the technical characteristics of the elevator for cleaning the dirt settler of the vehicle cleaning and washing equipment park, in particular, the height of the elevator and its productivity, as well as building analytical and graphical dependencies of these values on the operating parameters of the machinery. **Methodology.** To achieve this goal, we used the calculation algorithms presented in the modern technical literature and analyzed the factors and values that affect the height and capacity of the elevator of the station. It has been established that in order to determine the design parameters of the elevator, it is necessary to have statistical data on the operation of machinery at the enterprise and to carry out a detailed calculation, which includes: the mathematical expectation of the average daily number of machine trips from the fleet for different types of machinery, as well as the total value, the number of numbered machine servicing, the number of external machine washing stations, and the geometric parameters of the dirt tank. **Findings.** A graphical analysis of the influence of the number of tracked and wheeled vehicles and their annual consumption rates of motor resources on the value of its height and productivity was carried out for the elevator of the cleaning and washing station of the fleet of a particular enterprise, which is intended for cleaning the sludge tank. It was found that the functions of change in productivity and height are linearly increasing (with other parameters fixed). **Originality.** The authors first investigated the dependencies of the design parameters (height and capacity) of the elevator, built analytical dependencies of the mathematical expectation of the average daily number of machine trips for wheeled and tracked vehicles on the number of relevant machines and annual motor resource consumption rates, as well as the height and capacity of the elevator. For the examples of enterprise fleets with equipment operation parameters taken from statistical data, a graphical analysis of the constructed dependencies was carried out. **Practical value.** The use of the constructed dependencies makes it possible to determine the general nature and range of changes in the above design parameters in the case of varying equipment performance at a particular enterprise. The proposed dependencies can be used to quickly determine the required design parameters of an elevator based on specific data on the operation of equipment.

**Keywords:** equipment park; cleaning and washing point; conveyor; productivity; height; motor resource

### REFERENCES

1. Bilostotskyi, V. O., Mazorenko, D. I., Tishchenko, L. M., & Minyaylo, A. V. (2009). *Atlas konstruktivno-pidomno-transportnykh mashyn. Chastyna II. Transportni mashyny*. Kharkiv: Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture. (in Ukrainian)
2. Bohomaz, V. M. (2015). Influence analyses of designed characteristics of the elevator to the parameters of its drive. *Science and Transport Progress*, 3(57), 162-175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46076> (in Ukrainian)
3. Bohomaz, V. M., & Anofriev, P. G. (2023). Research of the influence of design parameters of a vibrating conveyor on its technical characteristics. *Science and Transport Progress*, 3(103), 60-68. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/292718> (in Ukrainian)
4. Bondarev, V. S., Dubinets, O. I., Kolisnyk, M. P., Bondarev, S. V., Gorbatenko, Y. P., & Barabanov, V. Y. (2009). *Pidomno-transportni mashyny: rozrakhunky pidiimalnykh i transportuvalnykh mashyn: pidruchnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)

## МАШИНОБУДУВАННЯ

5. Dereza, O. O. (2016). *Mashyny bezperervnogo transportu*. Melitopol: Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University. (in Ukrainian)
6. Ivanchenko, F. K. (1993). *Pidiomno-transportni mashyny: pidruchnyk*. Kyiv: Vyscha shkola. (in Ukrainian)
7. Kalenyk, M. M., Naniivskyi, R. A., & Hembarskyi, O. S. (2016). *Orhanizatsiia ekspluatatsii ta remontu inzhenernoho ozbrovannia: navchalnyi posibnyk*. Lviv: NASV. (in Ukrainian)
8. Kalenyk, M. M., Naniivskyi, R. A., & Hembarskyi, O. S. (2017). *Osnovy proektuvannya parkiv tekhniky: metodychnyy posibnyk*. Lviv, NASV. (in Ukrainian)
9. Zaichenko, S. V., Pobigailo, V. A., & Dubovyk, V. G. (Comp.). (2022). *Transportni systemy elektromekhanichnykh kompleksiv: konspekt lektsii*. Kyiv: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». (in Ukrainian)
10. Al-Kodmany, K. (2023). Smart Elevator Systems. *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research*, 6(1), 41-53. DOI: <https://doi.org/10.30564/jmmmr.v6i1.5503> (in English)
11. Kougawa, Y., Omachi, A., Iwase, S., & Sakurai, K. (2017). Hitachi's core concept for elevator and escalator products and services, and concept model. *Hitachi Review*, 66, 197. (in English)
12. March, J., Rupe, E., & Baker, R. (2014). *Vertical Transportation and Logistics in Mixed-Use High-Rise Towers* (pp. 861–865). CTBUH: Chicago, IL, USA. (in English)
13. Marsong, S., & Plangklang, B. (2016). Implementation Analysis of an Elevator Energy Regenerative Unit (EERU) For Energy Saving in a Building. In *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* (pp. 1-5). Chiang Mai, Thailand. (in English)
14. Raksha, S., Bohomaz, V., Shcheka, I., Stefanov, V., & Nesterenko, A. (2018). Research of the dependence of pneumatic conveyor compressors power on project parameters of transport machines. *MATEC Web of Conferences*, 230, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001009> (in English)
15. Sachs, H., Misuriello, H., & Kwatra, S. (2015). *Advancing Elevator Energy Efficiency*. American Council for an Energy-Efficient Economy: Washington, DC, USA. (in English)

Надійшла до редколегії: 03.05.2024

Прийнята до друку: 19.09.2024

## УДК 625.57:621.311

О. С. КУРОП'ЯТНИК<sup>1\*</sup>, О. Л. КРАСНОЩОК<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 674 26 44, ел. пошта kuropyatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

<sup>2\*</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (098) 706 27 43, ел. пошта akrasnoshchok1996@gmail.com, ORCID 0000-0002-0140-5179

## Уточнення методики визначення характеристик канатних доріг

**Мета.** У цій роботі поставлено за мету уточнити методику та розробку алгоритму визначення характеристик канатних доріг традиційної конструкції та із самохідними вагонами із врахуванням нових факторів впливу. **Методика.** Проведено аналіз наявних методик визначення характеристик канатних доріг різних конструкцій. Досягнення зазначеної мети здійснено шляхом врахування ваги індивідуального приводу та фактичного кута підйому вагона відносно горизонту – для самохідного вагона; впливу коефіцієнта зчеплення каната з натяжним шківом та кута огинання канатом натяжного шківа – для канатної дороги традиційного типу. Для визначення необхідної потужності приводу канатної дороги із самохідними вагонами методом силового аналізу враховано вплив ваги індивідуального приводу самохідного вагона, а також фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту. Для канатних доріг традиційного типу використано методику обходу за контуром, яка враховує коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом, а також кут огинання канатом натяжного шківа. **Результати.** Отримано залежності необхідної потужності приводу від проєктних параметрів канатної дороги з урахуванням нових факторів впливу. Вибір конкретної методики розрахунку необхідної потужності обґрунтовано відповідно до обраного типу дороги та вихідних даних. Отримані результати можна доповнити шляхом проведення додаткових розрахунків за формулами, наведеними в цій роботі. Представлені алгоритми з визначення характеристик канатної дороги за уточненою методикою дозволяють на рівні програмування складати програмне забезпечення для точного розрахунку значення необхідної потужності приводу. **Наукова новизна.** Уточнено залежності необхідної потужності приводу від характеристик канатної дороги шляхом врахування додаткових факторів, що дозволило більш точно оцінити їх вплив на остаточний результат. **Практична значимість.** Результати цієї роботи можуть бути використані під час проєктування енергоефективних канатних доріг, для яких електродвигун підбирають за уточненою методикою, що враховує більшу кількість факторів впливу на необхідну потужність приводу.

**Ключові слова:** канатна дорога; тяговий розрахунок; силовий розрахунок; силові параметри; енергоефективність

## Вступ

Канатні дороги широко використовують для перевезення пасажирів і вантажу. Також вони відомі високими показниками рівня безпеки, швидкості перевезень, екологічності, енергоефективності [8, 13], низькими витратами на забудову та обслуговування відносно інших видів транспорту.

Канатні дороги можуть належати до машин дискретного або безперервного транспорту. Залежно від технічного завдання на стадії планування канатна дорога може бути взяти такого типу:

– із самохідними вагонами (децентралізована тяга);

– одно- або двоканатною, із маятниковим або коловим рухом вагонів (централізована канатна тяга).

Канатну дорогу із самохідними вагонами обладнують індивідуальним приводом на кожній одиниці рухомого складу. Конструкція канатної дороги такого типу передбачає використання несного каната.

Одноканатні дороги мають лише один вид каната – тяговий, до якого жорстко кріплять вагони, які рухаються за заданою трасою між кінцевими точками.

Двоканатні дороги поєднують два види канатів: несні канати, по яких котяться ходові колеса вагонів, і тяговий канат, за допомогою якого відбувається рух вагонів.

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Одним зі шляхів підвищення енергоефективності канатних доріг є уточнення методики проектного розрахунку тягових канатів [4]. Також важливо для проектного розрахунку канатної дороги вибирати канати відповідно до заданих (проектних) навантажень та відповідних коефіцієнтів запасу міцності до умов використання. Аналогічний результат можна очікувати в разі підвищення точності розрахунку інших елементів канатної дороги.

### Мета

Основною метою цієї роботи є уточнення методики та розробка алгоритму визначення характеристик канатної дороги шляхом врахування ваги індивідуального приводу та фактичного кута підйому вагона відносно горизонту – для самохідного вагона і впливу коефіцієнта зчеплення каната з натяжним шківом та кута огинання канатом натяжного шківа – для канатної дороги традиційного типу.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- аналіз наявних методик визначення характеристик канатної дороги для виявлення факторів, які мають вплив на точність результатів розрахунків, але не були враховані;
- уточнення формул для визначення окремих характеристик канатної дороги шляхом врахування виявлених факторів;
- порівняння результатів розрахунків за відомою методикою та уточненою для встановлення суттєвості впливу факторів, які не було враховано;
- розробка алгоритму визначення характеристик канатної дороги за уточненою методикою для встановлення чіткої послідовності дій у разі виконання розрахунків за різних сполучень вихідних даних.

У роботі розглядаємо та порівнюємо методику визначення характеристик канатної дороги із самохідними вагонами та двоканатної дороги з коловим рухом (далі – традиційного типу).

### Методика

*Наявні методики розрахунку необхідної потужності приводу канатних доріг бувають:*

- 1) силового аналізу [5];
- 2) обходу за контуром [4];
- 3) інші.

Вибір конкретної методики розрахунку необхідної потужності обґрунтовують, виходячи з обраного типу дороги та вихідних даних. Наприклад, для канатних доріг із самохідними вагонами варто визначати необхідну потужність приводу за методом силового аналізу, а для канатних доріг традиційного типу – за методом обходу за контуром.

Вихідні дані для проектування канатної дороги визначають за факторами, що враховують різні аспекти – від географічних умов, рельєфу місцевості, пасажиропотоків до технічних вимог та економічної ефективності. До них можуть належати:

- відстань між кінцевими точками (станціями), виміряна по горизонталі;
- перепад висот між кінцевими точками;
- схема рельєфу місцевості;
- необхідна продуктивність (пропускна здатність);
- необхідний інтервал руху вагонів в одиницях часу (для пасажирських доріг) або довжини.

За цими даними визначають характеристики канатної дороги:

- фактичну продуктивність (пропускну здатність);
- схему профілю дороги (із розставленням опор);
- довжину та перепади висот прогонів;
- фактичний інтервал руху вагонів в одиницях часу (для пасажирських доріг) або довжини;
- швидкість руху вагонів;
- місткість вагонів;
- потужність приводу;
- інші характеристики (залежно від особливостей конструкції та використання дороги).

*Аналіз методики силового аналізу [5] для канатних доріг із самохідними вагонами показав, що під час розрахунку не враховано такі фактори:*

- фактична вага індивідуального приводу самохідного вагона;
- фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту.

Під час аналізу методики обходу за контуром [4] для канатних доріг традиційного типу з'ясовано, що до розрахунку не взято такі фактори:

## МАШИНОБУДУВАННЯ

– коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом;

– кут огинання канатом натяжного шківа.

Розглянемо, як буде впливати врахування цих факторів, складемо уточнені методики розрахунків для обох типів доріг та порівняємо результати.

*Силовий розрахунок приводу самохідного вагона.* У зв'язку з конструктивною аналогічністю та самохідним принципом руху методика визначення сил опору руху самохідного вагона ґрунтується на формулах визначення сил опору механізму пересування вантажного візка козлового крана [5] за умови врахування особливостей шляху – несний канат замість рейок.

Силовий розрахунок необхідної потужності приводу самохідного вагона розглянуто для випадку, коли самохідний вагон рухається на підйом (рис. 1), а вітрове навантаження направлене перпендикулярно руху вагона.

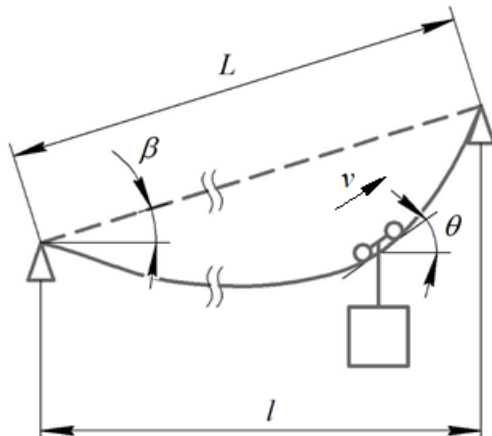


Рис. 1. Схема руху самохідного вагона на підйом

Fig. 1. Scheme of movement of a self-propelled car on an ascent

Необхідну потужність приводу самохідного вагона визначаємо за формулою:

$$P = \frac{Wv}{\eta}, \quad (1)$$

де  $W$  – загальний опір пересуванню самохідного вагона;  $v$  – швидкість руху самохідного вагона;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії індивідуального приводу.

Загальний опір пересуванню самохідного вагона визначаємо за формулою

$$W = W_{\text{тр}} + W_{\text{вн}} + W_{\text{п}}, \quad (2)$$

де  $W_{\text{тр}}$  – опір руху від сил тертя;  $W_{\text{вн}}$  – опір руху від вітрового навантаження;  $W_{\text{п}}$  – опір руху на підйом.

Зважаючи на те, що фактичний кут підйому  $\theta$  вагона відносно горизонту є суттєвим, до формули для визначення опору руху від сил тертя вводим множник  $\cos \theta$ :

$$W_{\text{тр}} = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) w \cos \theta, \quad (3)$$

де  $G_{\text{вж}}$  – номінальна вага вантажу,  $G_{\text{вж}} = m_{\text{вж}} g$ ,  $m_{\text{вж}}$  – номінальна маса вантажу;  $G_{\text{в}}$  – вага самохідного вагона,  $G_{\text{в}} = m_{\text{в}} g$ ,  $m_{\text{в}}$  – маса самохідного вагона;  $G_{\text{пр}}$  – вага приводу самохідного вагона,  $G_{\text{пр}} = m_{\text{пр}} g$ ,  $m_{\text{пр}}$  – маса приводу самохідного вагона;  $w$  – коефіцієнт опору руху [5].

У роботі [5] масу приводу самохідного вагона взято рівною 20 % від маси самого вагона. Уточнена методика передбачає врахування фактичної маси приводу, яку визначають за алгоритмом, блок-схему якого подано далі.

Несний канат при за великої довжини та малої жорсткості на згинання умовно вважають абсолютно гнучким і для розрахунку використовують положення теорії (механіки) гнучкої нитки [6].

За методикою силового аналізу отримана формула з визначення розривного зусилля несного каната:

$$F_0 = 1,25 \cdot 0,045 \frac{(m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}}) g}{u} \times \sqrt{\frac{1000 Q n_{\text{д}} n_{\text{г}}}{m_{\text{вж}}}} z_{\text{н}}, \quad (4)$$

де  $u$  – загальна кількість коліс візка самохідного вагона;  $Q$  – годинна продуктивність;  $n_{\text{д}}$  – кількість робочих днів на рік;  $n_{\text{г}}$  – кількість робочих годин на добу;  $z_{\text{н}}$  – коефіцієнт запасу міцності несучого каната [6].

За отриманим розривним зусиллям згідно з формулою (4) та каталогом несних канатів [10] і ISO 17893:2004 [11] вибираємо несний канат за умови, що межа міцності каната на ро-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

зрив (за каталогом) має бути менша за розривне зусилля.

Із використанням відомих формул для розрахунку гнучких ниток [6] та після перетворень тангенс фактичного кута нахилу підйому самохідного вагона становитиме:

$$\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg}\beta + \frac{4\chi(q_n L + m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}})}{q_n (L \cos\beta)^2}, \quad (5)$$

де  $q_n$  – погонна маса несного каната [10];  $\beta$  – кут нахилу хорди прогону;  $L$  – довжина хорди прогону;  $\chi$  – стріла провисання, для несних канатів  $\chi = (0,03 \dots 0,05)L$  [6].

Опір пересуванню самохідного вагона канатної дороги від вітрового навантаження визначаємо за формулою:

$$W_{\text{вн}} = W_{\text{вж}} + W_{\text{в}}, \quad (6)$$

де  $W_{\text{вж}}$  – сила тиску вітру на самохідний вагон;  $W_{\text{в}}$  – сила тиску вітру на візок самохідного вагона, з огляду на незначні габарити візка порівняно з габаритами вагона можна вважати, що  $W_{\text{в}} = 0$ .

Сила тиску вітру на самохідний вагон канатної дороги [5] становитиме:

$$W_{\text{вж}} = F_{\text{вж}} q k c n, \quad (7)$$

де  $F_{\text{вж}}$  – розрахункова площа самохідного вагона;  $q$  – динамічний тиск вітру;  $k$  – коефіцієнт, який враховує зміну динамічного тиску вітру по висоті;  $c$  – коефіцієнт аеродинамічної сили;  $n$  – коефіцієнт перевантаження.

Опір руху на підйом знаходимо за формулою:

$$W_{\text{п}} = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) \sin\theta. \quad (8)$$

Підставляючи формули (3), (6), (8) у формулу (1), отримуємо залежність:

$$W = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) w \cos\theta + (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) \times \sin\theta + F_{\text{в}} q k c n = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) \times (w \cos\theta + \sin\theta) + F_{\text{в}} q k c n. \quad (9)$$

Після виконання математичних перетворень отримуємо вираз:

$$W = g \cos\theta (m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}}) (w + \operatorname{tg}\theta) + F_{\text{в}} q k c n. \quad (10)$$

Остаточно необхідна потужність приводу самохідного вагона становитиме:

$$P = [g \cos\theta (m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}}) (w + \operatorname{tg}\theta) + F_{\text{в}} q k c n] \times \frac{1}{\eta} v. \quad (11)$$

*Тяговий розрахунок канатної дороги традиційного типу.* Розрахунок тягових зусиль двоканатної дороги з коловим рухом (традиційного типу) виконують із використанням методу обходу за контуром [4]. Основний принцип методу полягає у виявленні характерних точок траси, у яких відбувається зміна натягу каната.

Подальші розрахунки для канатних доріг традиційного типу будемо проводити за схемою, зображеною на рис. 2.

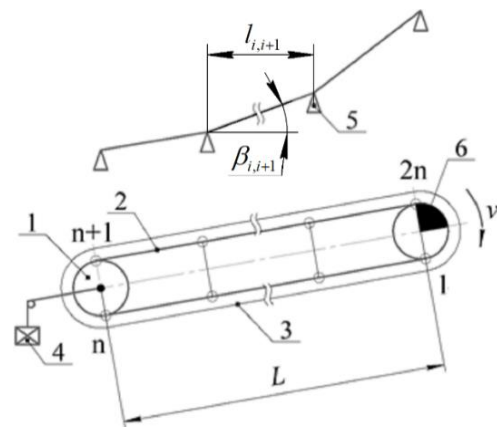


Рис. 2. Схема двоканатної дороги з кільцевим рухом:

1 – натяжний шків; 2 – тяговий канат; 3 – несучий канат; 4 – натяжний пристрій; 5 – опора; 6 – привідний шків

Fig. 2. Scheme of a two-channel road with circular motion:

1 – tension pulley; 2 – traction rope; 3 – carrier rope; 4 – tensioning device; 5 – support; 6 – drive pulley

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Необхідна потужність приводу канатної дороги традиційного типу становитиме:

$$P = \frac{F_0 v}{\eta}, \quad (12)$$

де  $F_0$  – окружне зусилля;  $v$  – швидкість руху вагонів;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії приводу.

При цьому опір переміщенню каната між точкою  $i$  та наступною  $i+1$  визначаємо за формулою:

$$W_{i,i+1} = ql_{i,i+1} (w \cos \beta_{i,i+1} \pm \sin \beta_{i,i+1}), \quad (13)$$

де  $q = \left( q_T + \frac{m_B + m_{ВЖ}}{\lambda} \right) g$  – зведене погонне навантаження [5];  $q_T$  – питома маса 1 м тягового каната;  $l_{i,i+1}$  – довжина хорди траси між  $i$ -ю та  $i+1$  точками прогону;  $\beta_{i,i+1}$  – кут нахилу хорди між  $i$ -ю та  $i+1$  точками прогону; якщо  $i = n+1, 2n-1$ , то для розрахунку ділянки профілю на підйом беремо знак «+»; якщо  $i = 1, n$ , то для розрахунку ділянки профілю на спуск беремо знак «-»;  $n$  – кількість точок траси (в одну сторону), у яких відбувається зміна натягу каната (рис. 2).

Використовуючи метод обходу за контуром, визначимо натяг каната в точці  $n$  та наступній  $n+1$  точках, виражаючи їх через натяг  $T_1$ :

$$T_n = T_1 + \sum_{i=1}^n W_i; \quad (14)$$

$$T_{n+1} = kT_n, \quad (15)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що враховує збільшення натягу каната під час огинання ним натяжного шківів;  $k=1,05$  за кута огинання  $\alpha=180^\circ$ , що визначено відповідно до коефіцієнта, що враховує збільшення натягу стрічки під час огинання нею натяжного барабана стрічкового конвеєра [3].

До уточнення методики втрати енергії на огинання канатом натяжного шківів не враховували.

Натяг каната в точці  $2n$  визначаємо за формулою:

$$T_{2n} = T_{n+1} + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i. \quad (16)$$

Колове зусилля приводу канатної дороги традиційного типу становитиме:

$$F_0 = T_{2n} - T_1. \quad (17)$$

Можливість реалізації тяги канатної дороги забезпечується в разі дотримання умови:

$$T_{2n} \leq T_1 \exp(f\alpha), \quad (18)$$

де  $f$  – коефіцієнт зчеплення каната з привідним шківом [3];  $\alpha$  – кут огинання канатом привідного шківів.

Розривне зусилля в канаті знаходимо з виразу:

$$F_{\text{розр}} = T_{2n} z_T, \quad (19)$$

де  $z_T$  – коефіцієнт запасу міцності тягового каната [7].

За отриманим розривним зусиллям згідно з формулою (19) та каталогом тягових канатів [9] і EN 12385-4:2002 [12] вибираємо тяговий канат за умови, що межа міцності каната на розрив (за каталогом) має бути менша за розривне зусилля.

Підставляючи формули (15), (14) у формулу (16) та розглядаючи умову граничного стану натягу в точці  $2n$  за формулою (17), після спрощень отримаємо рівняння:

$$kT_1 + k \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i = T_1 \exp(f\alpha). \quad (20)$$

Із рівняння (20) визначаємо натяг каната в точці 1 та після спрощення отримаємо формулу:

$$T_1 = \frac{k \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i}{\exp(f\alpha) - k}. \quad (21)$$

Після підстановки формул (18), (21) у формулу (17) та виконання математичних перетворень отримаємо:

$$F_0 = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \left( k \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i \right). \quad (22)$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Правило визначення знака кута нахилу хорди прогону ( $\beta$ ):

1) під час руху на підйом значення кута нахилу хорди прогону вважати додатним (рис. 3, а);

2) під час руху на спуск значення кута нахилу хорди прогону вважати від'ємним (рис. 3, б).

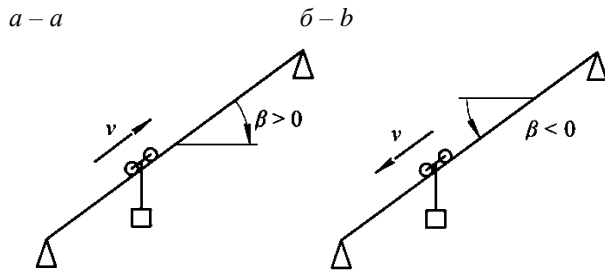


Рис. 3. Схема для визначення знака кута нахилу хорди прогону:

$a$  – під час підйому;  $b$  – під час спуску

Fig. 3. Scheme for determining the angle sign of inclination of the runway chord:

$a$  – during ascent;  $b$  – during descent

Сумарний опір руху під час підйому на ділянці профілю між точками  $n+1$  та  $2n$ :

$$W_{n+1,2n} = qL_i (w \cos \beta_i - \sin(-\beta_i)) = qL_i (w \cos \beta_i + \sin \beta_i), \quad (23)$$

де  $i = \overline{n+1 \dots 2n}$ ;  $L_i$  – довжина траси  $i$ -го прогону;  $\beta$  – кут нахилу хорди  $i$ -го прогону.

Після математичних перетворень та спрощення маємо:

$$W_{n+1,2n} = qL_i (w + tg\beta_i). \quad (24)$$

Сумарний опір руху під час спуску на ділянці профілю між точками 1 та  $n$ :

$$\sum_{i=1}^n W_i = q \sum_{i=1}^{n-1} l_{i,i+1} (w + tg\beta_{i,i+1}), \quad (25)$$

де  $i = \overline{1 \dots n}$ .

Величини опорів руху під час підйому на ділянці профілю між точками та :

$$W_{i,i+1} = ql_{i,i+1} (w + tg\beta_{i,i+1}), \quad (26)$$

де  $i = \overline{n+1 \dots 2n}$ .

Сумарний опір руху під час підйому на ділянці профілю між точками  $n+1$  та  $2n$ :

$$\begin{aligned} \sum_{i=n+1}^{2n} W &= q \sum_{i=n+1}^{2n-1} l_{i,i+1} (w + tg\beta_{i,i+1}) = \\ &= q \left( \sum_{i=n+1}^{2n-1} l_{i,i+1} w + \sum_{i=n+1}^{2n-1} h_{i,i+1} \right), \quad (27) \end{aligned}$$

де  $h_{i,i+1}$  – перевищення в прогоні між точками  $i$ ,  $i+1$ .

Після спрощення отримуємо вираз для визначення сумарного опору руху як на підйом, так і на спуск:

$$\sum_{i=n+1}^{2n} W = \sum_{i=1}^n W = q[wL + H], \quad (28)$$

де  $L = \sum_{i=1}^{n-1} l_{i,i+1} = \sum_{i=n+1}^{2n-1} l_{i,i+1}$ ;  $H = \sum_{i=1}^{n-1} h_{i,i+1} = \sum_{i=n+1}^{2n-1} h_{i,i+1}$ .

Після підстановки формул (15), (27) у формулу (16) математичних перетворень та спрощень отримуємо:

$$T_{2n} = g \left( \frac{m_{вж}}{\lambda} + \frac{m_{вар}}{\lambda} + q_T \right) L \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - k} \times (1+k) [w + tg\beta]. \quad (29)$$

Після підстановки формули (28) у формулу (22) отримуємо:

$$F_O = [kq(wL + H) + q(wL + H)] \times \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k}. \quad (30)$$

Після перетворень колове зусилля канатної дороги традиційної конструкції становитиме:

$$F_O = gL \left( \frac{m_{вж}}{\lambda} + \frac{m_{вар}}{\lambda} + q_T \right) \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \times (1+k) [w + tg\beta]. \quad (31)$$

Остаточно необхідна потужність приводу канатної дороги традиційного типу становитиме:

$$P = \frac{1}{\eta} gLv \left( \frac{m_{вж}}{\lambda} + \frac{m_{вар}}{\lambda} + q_T \right) \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \times (1+k) [w + tg\beta]. \quad (32)$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Алгоритм визначення характеристик канатної дороги за уточненою методикою. Для встановлення чіткої послідовності дій під час виконання розрахунків розробляємо алгоритм, що дозволяє формалізувати послідовність виконання розрахунків за різних сполучень вихідних даних. Для вибору електродвигуна приводу самохідного вагона необхідної потужності за уточненим методом силового аналізу розроблено блок-схему, яку зображено на рис. 4.

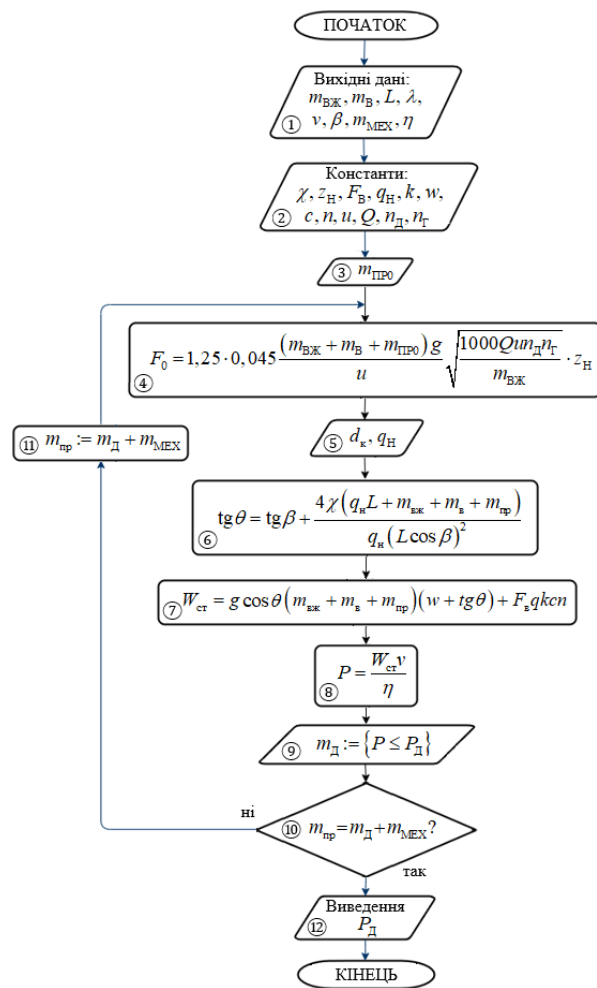


Рис. 4. Блок-схема алгоритму вибору електродвигуна самохідного вагона з необхідною потужністю приводу

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for selecting a self-propelled car electric motor with the required drive power

Алгоритм складається з основних операцій:

- ① вводимі вихідні дані;
- ② вводимі значення констант;

③ беремо орієнтовне значення маси приводу;

④ розраховуємо розривне зусилля несного каната;

⑤ за каталогом [10] та ISO 17893:2004 [11] визначаємося діаметр та погонну масу несного каната;

⑥ визначаємо тангенс фактичного кута нахилу підйому самохідного вагона за формулою (5);

⑦ визначаємо загальний статичний опір пересуванню за формулою (10);

⑧ визначаємо необхідну потужність електродвигуна за формулою (11);

⑨ орієнтовно підбираємо електродвигун та визначаємо масу електродвигуна за каталогами електродвигунів;

⑩ перевіряємо умову, чи збігається значення маси приводу з попередньо взято (п. 3);

⑪ якщо у п. 10 – ні, беремо орієнтовно нову масу приводу, яка відповідає обраній із каталогу, та повторюємо розрахунок, починаючи з п. 4.;

⑫ із каталогу електродвигунів [2] беремо такий електродвигун, який відповідає необхідним заданим параметрам та має потужність не меншу за розраховану.

Для вибору електродвигуна приводу канатної дороги традиційного типу необхідною потужністю за уточненим методом обходу за контуром розроблено блок-схему, яку зображено на рис. 5.

Алгоритм складається з основних позицій:

① вводимі вихідні дані;

② вводимі значення констант;

③ беремо орієнтовне значення питомої ваги 1 м тягового каната;

④ розраховуємо натяг каната в точці за формулою (29);

⑤ визначаємо розривне зусилля тягового каната за формулою (19);

⑥ за каталогом тягових канатів [12] та EN 12385-4:2002 [9] вибираємо тяговий канат;

⑦ перевіряємо умову збігу значень орієнтовної питомої ваги 1 м тягового каната (п. 3) із взятим (п. 6);

⑧ якщо у п. 7 значення не збігається, беремо отримане значення питомої ваги 1 м тягового каната з п. 6 та повторюємо розрахунок з п. 4.;

⑨ якщо у п. 7 значення збігається, визначаємо колове зусилля за формулою (31);

## МАШИНОБУДУВАННЯ

⑩ визначаємо необхідну потужність електродвигуна за формулою (32);

⑪ із каталогу електродвигунів [2] обираємо електродвигун, який відповідає необхідним заданим параметрам та має потужність не меншу за розраховану;

⑫ виводимо отриманий результат.

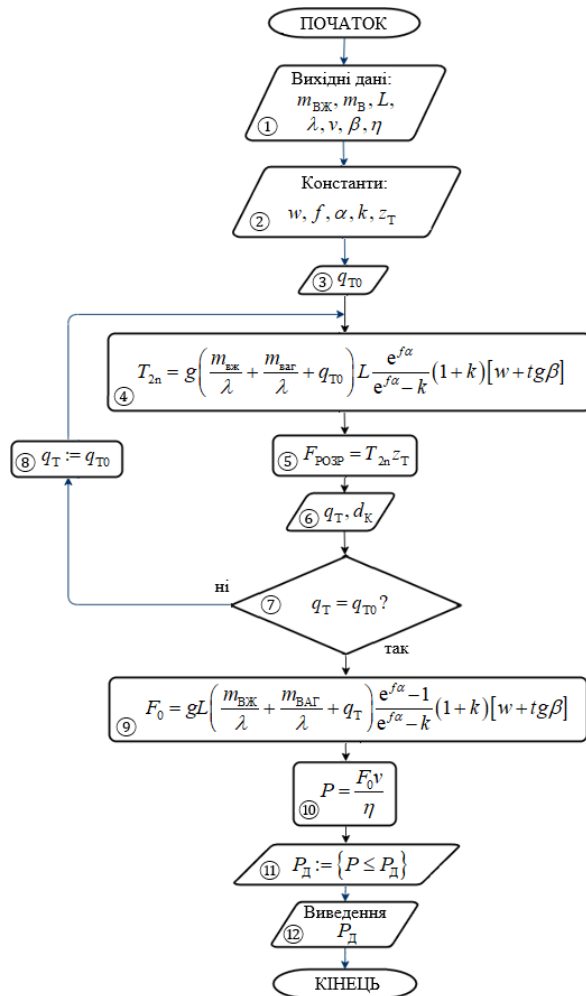


Рис. 5. Блок-схема алгоритму вибору електродвигуна канатної дороги традиційного типу з необхідною потужністю приводу

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for selecting a traditional type cableway electric motor with the required drive power

### Результати

Для встановлення суттєвості впливу факторів, які не було враховано, виконаємо порівняння результатів розрахунків за відомою методикою та уточненою.

Було проведено низку досліджень, у яких визначено необхідну потужність приводу для канатних доріг традиційної конструкції та із самохідними вагонами, розглянуто понад 200 розрахункових випадків для кожного типу, що дозволяє нам детально проаналізувати отримані результати.

Розрахунки проведено за такими базовими характеристиками (однакові для доріг обох типів):

- довжина хорди прогону = 1 000 м;
- інтервал руху вагонів = 100 м;
- швидкість руху вагонів = 3 м/с;
- кількість вагонів в одному напрямку руху = 10 од.;
- комбінації мас вантажу і вагонів наведено в табл. 1;
- кут огинання канатом привідного шківів дороги традиційного типу = 180°;
- коефіцієнт, що враховує збільшення натягу тягового каната під час огинання ним прямого шківів = 1,05;
- коефіцієнт запасу міцності тягового каната = 4 [7];
- коефіцієнт запасу міцності несного каната = 3,15 [7];
- кут нахилу хорди прогону змінний у діапазоні від 0 до 20°;
- коефіцієнт опору руху = 0,0065 [5];
- стріла провисання несного каната = 40 м [8];

Таблиця 1

### Комбінації мас вантажу та вагонів

Table 1

### Combinations of cargo and wagon weights

Типорозмір вагона	m <sub>вж</sub> , кг	m <sub>ваг</sub> , кг
№1	700	483
№2	882	508
№3	1 120	537
№4	1 400	567
№5	1 750	600

- розрахункова площа вагона = 1,6 м<sup>2</sup> (за 3D моделлю вагона у SolidWorks);
- динамічний тиск вітру = 250 Па [5];

## МАШИНОБУДУВАННЯ

- коефіцієнт, який враховує зміну динамічного тиску вітру по висоті = 1,4 [5];
- коефіцієнт аеродинамічної сили = 1,2 [5];
- коефіцієнт перевантаження = 1.

Результати розрахунків зведені у вигляді графіків. Графік залежності необхідної потужності двигуна самохідного вагона від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагона № 3) зображено на рис. 6. Лінія 1 показує результати розрахунку за відомою методикою; лінія 2 – результати за уточненою методикою.

Різницю результату розрахунку за методами можна розрахувати за формулою:

$$\Delta = \frac{|P_2 - P_1|}{P_1} \cdot 100\%, \quad (33)$$

де – значення необхідної потужності приводу за відомою методикою; – значення необхідної потужності приводу за уточненою методикою.

З графіка на рис. 6 видно, що значення необхідної потужності приводу двигуна самохідного вагона за уточненою методикою значно вище, ніж за результатами розрахунку за відомою методикою.

Максимальне значення різниці розрахунку складає 462 %, мінімальне 91 %, середнє 150,5 %.

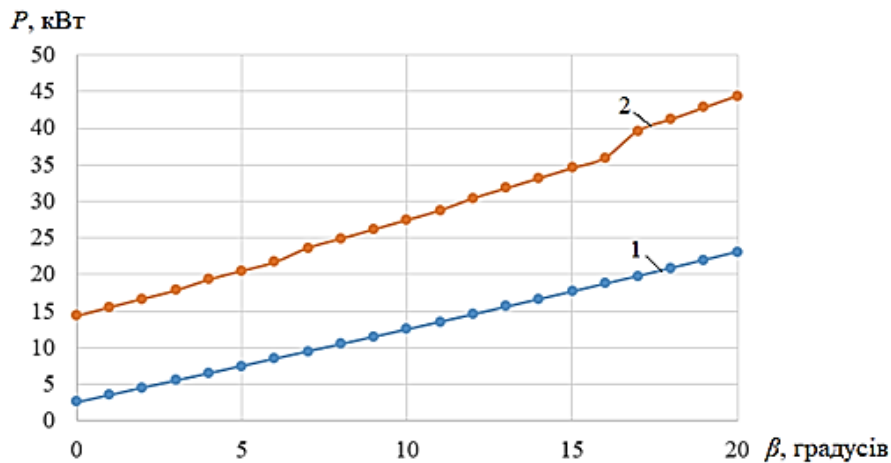


Рис. 6. Графік залежності необхідної потужності двигуна самохідного вагона від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагонів 3 (табл. 1): 1 – розрахунок за відомою методикою; 2 – за уточненою методикою

Fig. 6. Graph of the dependence of the required engine power of a self-propelled railcar on the angle of inclination of the chord of the run (for a combination of masses of railcar size 3 (Table 1): 1 – calculation by the known method; 2 – by the revised method

Як бачимо, що уточнення методики розрахунку необхідної потужності приводу двигуна самохідного вагона значною мірою впливає на результат завдяки врахуванню таких факторів, як фактична вага індивідуального приводу самохідного вагона та фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту.

На рис. 7 показано графік залежності необхідної потужності приводу двигуна канатної

дороги традиційної конструкції від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагонів 3 (табл. 1)).

Із графіка на рис. 7 видно, що зі збільшенням кута нахилу хорди прогону значення необхідної потужності приводу двигуна канатної дороги традиційної конструкції за уточненою методикою помірно зростають порівняно з результатами розрахунку за відомою методикою.

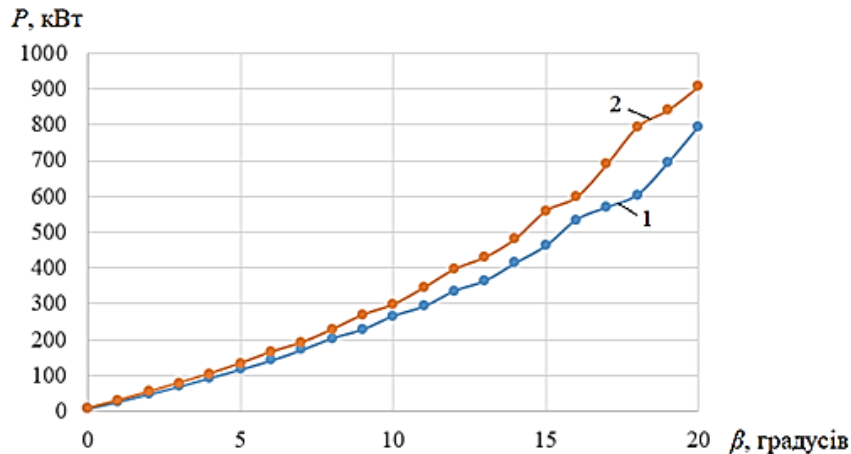


Рис. 7. Графік залежності необхідної потужності приводу двигуна канатної дороги традиційної конструкції від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагонів 3 (табл. 1):  
1 – розрахунок за відомою методикою; 2 – за уточненою методикою

Fig. 7. Graph of the dependence of the required drive power of the motor of a conventional cableway on the angle of inclination of the chord of the run (for a combination of masses of car size 3 (Table 1):  
1 – calculation by the known method; 2 – by the revised method

Максимальне значення різниці розрахунку складає 23,9 %, мінімальне 10,55 %, середнє 13,7 %.

Таким чином, що уточнення методики розрахунку необхідної потужності приводу двигуна канатної дороги традиційної конструкції значною мірою впливає на результат у зв'язку з врахуванням таких факторів, як коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом та кут огинання канатом натяжного шківа.

#### Наукова новизна та практична значимість

Уточнено залежність необхідної потужності приводу від характеристик канатної дороги з урахуванням додаткових факторів, що дозволило точніше оцінити їхній вплив на остаточний результат.

Аналіз наявних методик показав необхідність врахування більшої кількості факторів для розрахунку потрібної потужності приводу.

Результати цієї роботи можуть бути використані під час проектування енергоефективних канатних доріг, де електродвигун підбирають за уточненою методикою, що враховує більшу кількість факторів, які впливають на необхідну потужність приводу.

#### Висновки

Використання уточненої методики розрахунку необхідної потужності приводу двигуна канатних доріг дає можливість більш коректно обирати двигун, що забезпечить кращі умови роботи приводу канатної дороги. Результати розрахунку показали високий вплив факторів, які раніше не враховували, на необхідну потужність приводу двигуна канатної дороги.

Такими факторами для канатної дороги із самохідними вагонами є:

- фактична вага індивідуального приводу самохідного вагона;
- фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту.

Для канатних доріг традиційного типу враховано такі фактори:

- коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом;
- кут огинання канатом натяжного шківа.

Для встановлення чіткої послідовності дій під час виконання розрахунків складено алгоритм, що дозволяє формалізувати послідовність виконання розрахунків за різних сполучень вихідних даних.

Отримані результати можуть бути використані під час проектування та модернізації канатних доріг традиційної конструкції та із самохідними вагонами. Також нова методика може бути корисною для розрахунків енергоефективних параметрів канатних доріг.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 12385-4:2017 Канати сталеві дротяні. Безпека. Частина 4. Канати подвійної звивки для загального підйомного застосування (EN 12385-4:2002 + A1:2008, IDT). На заміну ДСТУ EN 12385-4:2014 [Чинний від 01-01-2019]. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації «Сталеві дротяні канати» (ТК 100), 2017. 28 с.
2. Каталог електродвигунів АИР. URL: [https://air.com.ua/uk/katalog\\_elektrodvyguniv\\_air/](https://air.com.ua/uk/katalog_elektrodvyguniv_air/)
3. Куроп'ятник О. С. Параметрична оптимізація стрічкових конвеєрів за критерієм енергоефективності. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 3 (93). С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242036>
4. Куроп'ятник О. С. Обґрунтування шляхів підвищення енергоефективності канатних доріг. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences* (Radom, 27–28 Dec., 2017). Radom. P. 159–162.
5. Куроп'ятник О. С., Краснощок О. Л. Порівняльний аналіз енергоефективності канатних доріг за питомою потужністю приводу. *Матеріали доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції: Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз* (Дніпро, 09 лист. 2023 р.). Дніпро: «Середняк Т. К.», 2023. С. 235–243.
6. Матвеев Е. М., Тисовський Л. О., Рудько І. М. Теоретичні та експериментальні дослідження силових і геометричних параметрів несучих канатів багатопрольотних транспортних установок. *Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2006. № 10. С. 438–442.
7. НПАОП 60.2-1.02-14. Правила будови і безпечної експлуатації пасажирських підвісних канатних доріг. На заміну НПАОП 60.22-1.01-74 [Чинний від 11-03-2014]. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. 152 с.
8. Ракша С. В., Куроп'ятник О. С., Краснощок О. Л. Обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195601>
9. Сологуб Б. В., Ланець О. В., Данило Я. Я. Аналіз навантажень при роботі спареної канатної дороги з перевантажувальним механізмом. *Підйомно-транспортна техніка*. 2018. № 3 (59). С. 4–14.
10. Full Lock Coil, Z-Lock. A powerful, high strength rope for deep shaft mining applications. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/full\\_lock\\_coil\\_z-lock/EN](https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/full_lock_coil_z-lock/EN)
11. ISO 17893:2004/Amd 1:2010 Steel wire ropes - Vocabulary, designation and classification. Full Lock International Standard confirmed, 2010. 6 p.
12. NCR6. The stable steel rope for aerial transportation and open pit mining. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/4766/EN](https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/4766/EN)
13. Szlosarek R., Yan C., Kröger M., Nußbaumer C. Energy efficiency of ropeways: a model-based analysis. *Public Transport*. 2019. Vol. 11. P. 617–635 DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-019-00212-1>

O. S. KUROIATNYK<sup>1\*</sup>, O. L. KRASNOSHCHOK<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 674 26 44, e-mail [kuropyatnick@gmail.com](mailto:kuropyatnick@gmail.com), ORCID 0000-0001-5581-3883

<sup>2\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 706 27 43, e-mail [akrasnoshchok1996@gmail.com](mailto:akrasnoshchok1996@gmail.com), ORCID 0000-0002-0140-5179

## Clarification of the Methodology for Determining the Characteristics of Cableways

**Purpose.** The aim of this study is to clarify the methodology and develop an algorithm for determining the characteristics of cableways of traditional design and with self-propelled cars, taking into account new factors of influence. **Methodology.** An analysis of existing methods for determining the characteristics of cableways of various

designs was carried out. This goal was achieved by taking into account the weight of the individual drive and the actual angle of the car's elevation relative to the horizon for a self-propelled car; the influence of the coefficient of adhesion of the rope to the tension pulley and the angle of envelopment of the rope around the tension pulley for a traditional cableway. To determine the required drive power of a cableway with self-propelled cars, the influence of the weight of an individual self-propelled car drive and the actual angle of the self-propelled car relative to the horizon are taken into account by the method of force analysis. For traditional cableways, the contour traversal method is used, which takes into account the coefficient of adhesion of the rope to the tension pulley, as well as the angle of envelopment of the tension pulley by the rope. **Findings.** The dependencies of the required drive power on the design parameters of the cableway were obtained, taking into account new factors of influence. The choice of a specific methodology for calculating the required power is justified in accordance with the selected type of road and the initial data. The results obtained can be supplemented by performing additional calculations using the formulas given in this paper. The presented algorithms for determining the characteristics of a cableway using the refined methodology allow, at the programming level, to develop software for accurately calculating the value of the required drive power. **Originality.** The dependence of the required drive power on the characteristics of the cableway was clarified by taking into account additional factors, which made it possible to more accurately assess their impact on the final result. **Practical value.** The results of this work can be used in the design of energy-efficient cableways, for which the electric motor is selected according to a refined methodology that takes into account more factors affecting the required drive power.

*Keywords:* cableway; traction calculation; power calculation; power parameters; energy efficiency

## REFERENCES

1. *Kanaty stalevi drotiani. Bezpeka. Chastyna 4. Kanaty podviinoi zvyvky dlia zahalnoho pidiomnoho zastosuvannya (EN 12385-4:2002 + A1:2008, IDT), 28 DSTU EN 12385-4:2017.* (2017). (in Ukrainian)
2. *Kataloh elektrodvyhunyv AYR.* URL: [https://anp.com.ua/uk/katalog\\_elektrodvyguniv\\_air/](https://anp.com.ua/uk/katalog_elektrodvyguniv_air/) (in Ukrainian)
3. Kuropiatnyk, O. S. (2021). Parametric Optimization of Belt Conveyors by Energy Efficiency Criterion. *Science and Transport Progress*, 3(93), 50-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242036> (in Ukrainian)
4. Kuropiatnyk, O. S. (Dec. 2017). Justification of Ways to Improve the Energy Efficiency of Ropeways. In *Modern Methods, Innovations, and Experience of Practical Application in the Field of Technical Sciences* (pp. 159-162). Radom, Republic of Poland. (in Ukrainian)
5. Kuropiatnyk, O. S., & Krasnoshchok, O. L. (Nov., 2023). Comparative analysis of the energy efficiency of cableways by surface power density drive. In *Report materials the 2nd International scientific and practical conference: Logistics and transport security: issues and development prospects in the context of analyzing contemporary challenges and threats* (pp. 235-243). Dnipro: Serednyak T. K. (in Ukrainian)
6. Matveev, E. M., Tysovskiy, L. O., & Rudko, I. M. (2006). Theoretical and experimental researches of power and geometrical parameters of bearing cables of transport plant with many runs. *Bulletin of Lviv National Environmental University Agroengineering Research*, 10, 438-442. (in Ukrainian)
7. *Pravyla budovy i bezpechnoi ekspluatatsii pasazhyrskykh pidvisnykh kanatnykh dorih, 152 NPAOP 60.2-1.02-14.* (2014). (in Ukrainian)
8. Raksha, S. V., Kuropiatnyk, O. S., & Krasnoshchok, O. L. (2019). Justification of criteria for ropeways energy efficiency. *Science and Transport Progress*, 6(84), 60-71. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195601> (in English)
9. Sologub, B. V., Lanets, O. V., & Danylo, Ya. Ya. (2018). Analysis of Loads in the Operation of Paired Ropeways with a Transshipment Mechanism. *Hoisting and conveying equipment*, 3(59), 4-14. (in Ukrainian)
10. Full Lock Coil, Z-Lock. A powerful, high strength rope for deep shaft mining applications. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/full\\_lock\\_coil\\_z-lock/EN](https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/full_lock_coil_z-lock/EN) (in English)
11. *Steel wire ropes - Vocabulary, designation and classification, 6 ISO 17893:2004/Amd 1:2010.* (2010). (in English)
12. NCR6. The stable steel rope for aerial transportation and open pit mining. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/4766/EN](https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/4766/EN) (in English)
13. Szlosarek, R., Yan, C., Kröger, M., & Nußbaumer, C. (2019). Energy efficiency of ropeways: a model-based analysis. *Public Transport*, 11(3), 617-635. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-019-00212-1> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.05.2024

Прийнята до друку: 30.09.2024

# РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.027.31-272.82:625.151.8-047.44

А. Я. КУЗИШИН<sup>1\*</sup>, В. В. КОВАЛЬЧУК<sup>2</sup>, Н. В. КОСТІВ<sup>3</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

<sup>3</sup>Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта nzkostiv@gmail.com, ORCID 0009-0005-5832-9786

## Дослідження впливу хрестовини стрілочного переводу на вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу

**Мета.** У роботі передбачено визначити величини вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу під час руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу в прямому та зворотному напрямках. **Методика.** Для визначення деформацій пневматичної ресори розроблено спеціальний випробувальний стенд, що складається із пневматичної ресори та спеціалізованого вимірювального обладнання. Деформації пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах виміряно за допомогою високочастотних потенціометричних датчиків лінійних переміщень, сигнали від яких зчитано за допомогою запрограмованого аналогово-цифрового перетворювача. Для отримання достовірних даних щодо деформацій пневматичної ресори здійснено по шість проїздів випробувального стенда в прямому та зворотному напрямках хрестовини. **Результати.** Розроблено методологію динамічних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу в прямому та зворотному напрямках. Отримано записи вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу. Установлено, що деформації пневматичної ресори у вертикальній площині є вищими за деформації в горизонтальній площині. Середнє значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в прямому напрямку складає 3,15 мм, що на 9,98 % вище за середнє значення у зворотному напрямку руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу. У горизонтальному напрямку така різниця деформації пневматичної ресори складає 25,1 %. **Наукова новизна.** Уперше визначено вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу із врахуванням напрямку руху, прямого та зворотного. **Практична значимість.** Визначення величин деформацій пневматичної ресори дозволить досліджувати її динамічні характеристики в різних умовах експлуатації рухомого складу, а на стадії його проектування обирати відповідні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування та визначати динамічні показники та показники безпеки руху рухомого складу.

*Ключові слова:* пневматична ресора; деформація; стрілочний перевід; хрестовина; прямий рух; зворотний рух

### Вступ

На залізничному транспорті, в умовах підвищених швидкостей руху, використовують рухомий склад, механічна частина якого містить пневматичну систему ресорного підвішування. Така система складається із пневматичної ресо-

ри, додаткового резервуара, з'єднувального трубопроводу, клапанів висоторегулювання та перепаду тиску між пневматичними ресорами, а також іншого допоміжного обладнання. На залізницях України таким рухомих складом є дизель-поїзди ДПКр-2 та ДПКр-3, а також

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

електропоїзди ЕКр–1 «Тарпан» та HRCS2 «Hyundai Rotem».

З огляду на експлуатацію рухомого складу в умовах підвищених швидкостей руху важливим є дотримання динамічних показників та показників безпеки руху [12]. Головним чином це залежить від динамічних характеристик в'язей, які з'єднують між собою складові елементи рухомого складу. Зокрема це пневматична ресора (рис. 1), яка знаходиться в другому ступені ресорного підвішування між кузовом та візком рухомого складу.

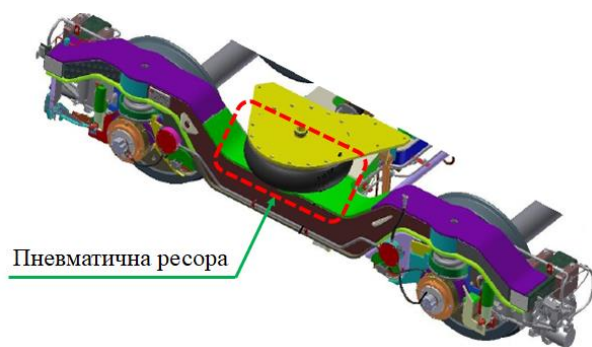


Рис. 1. Пневматична ресора другого ступеня ресорного підвішування швидкісного рухомого складу

Fig. 1. Pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of high-speed rolling stock

Значне збурення механічна частина рухомого складу отримує внаслідок взаємодії колісної пари з елементами рейкової колії в межах хрестовини стрілочного перевалу (рис. 2).

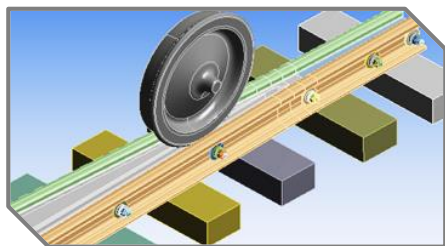


Рис. 2. Рух колеса по хрестовині стрілочного перевалу

Fig. 2. Movement of the wheel along the crosspiece of the turnout

Слід зазначити, що більшість досліджень динамічної поведінки пневматичної ресори спрямовані на знаходження характеристик жорсткості та демпфування, за умови попереднього задання синусоїдального збурення. Однак збурен-

ня у межах хрестовини стрілочного перевалу має складний випадковий характер, що передбачає необхідність проведення натурних досліджень динамічної роботи пневматичної ресори.

Отже, дослідження впливу хрестовини стрілочного перевалу на вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу є актуальним завданням. Це дозволить установити закономірності зміни вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори та достовірніше визначити динамічні показники, а саме коефіцієнти вертикальної та горизонтальної динаміки швидкісного рухомого складу в межах хрестовини стрілочного перевалу.

### Мета

Основною метою роботи є експериментальне встановлення величин деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу у вертикальній та горизонтальній площинах під час руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного перевалу у прямому та зворотному напрямках.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити методологію динамічних випробувань пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного перевалу.
2. Дослідити особливості зміни величин деформацій пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах в умовах руху по хрестовині стрілочного перевалу.

### Методика

Для визначення динамічних характеристик пневматичної ресори використовують теоретичні та експериментальні методи. Теоретичні методи передбачають використання механічних, термодинамічних та скінченноелементних математичних моделей [2]. Експериментальні методи передбачають виконання статичних або динамічних випробувань пневматичної ресори, за допомогою силового та вимірювального обладнання [1].

Механічні нелінійні динамічні моделі [5–6] передбачають взаємозв'язок між силою та деформацією, вони засновані на суперпозиції сил пружності, тертя і в'язкості. Залучення сили тер-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тя означає, що можна враховувати підвищену жорсткість за малих амплітуд зміщення, а також незалежне від швидкості демпфування (гістерезис).

Термодинамічні математичні моделі [9, 23] передусім дають можливість провести дослідження вертикальної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування, із врахуванням додаткового резервуара та з'єднувального трубопроводу, на основі законів гідро- та термодинаміки.

Використання скінченноелементних моделей пневматичної ресори [7, 13, 19, 20] передбачає знаходження її втомної міцності, а також динамічних характеристик у разі зміни факторів, які пов'язані як із конструкцією самої ресори, так і з конструкцією ходової частини. Такі дослідження виконують із використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

У праці [22] проведено теоретичне та експериментальне визначення вертикальної жорсткості пневматичної ресори. Для теоретичного визначення застосовано рівняння термодинаміки та гідродинаміки, а зміну геометричних параметрів визначено аналітичним методом. Під час експериментального дослідження застосовувалося випробувальну установку з приводом для задання синусоїдального збурення.

У роботі [18] досліджено вплив об'єму додаткового резервуара, довжини та діаметра з'єднувального трубопроводу на характеристики пневматичної системи ресорного підвішування. Стендові випробування проведено відповідно до стандарту EN13597 за вертикального навантаження 109,8 кН з амплітудою  $\pm 10$  мм і частотою від 0,5 до 10 Гц.

Вплив характеристик пневматичної системи ресорного підвішування на комфортність руху рухомого складу досліджено в [4]. Динамічні характеристики пневматичної ресори знайдено експериментальним шляхом із застосуванням випробувального стенда, який створює горизонтальні, вертикальні та обертові сили. Для аналізу впливу моделі підвіски на характеристики комфорту використано функції частотної характеристики, які дають вертикальне прискорення центра ваги кузова як функцію синусоїдальної нерівності рейкової колії.

У роботі [8] представлено декілька моделей з'єднувального трубопроводу. Установлено, що

для коротких з'єднувальних трубопроводів достатньо використовувати алгебраїчну модель, а для врахування динаміки більш довгих з'єднувальних трубопроводів необхідно застосовувати диференціальну модель. У подальшому модель пневматичної системи ресорного підвішування поєднано із багатокорпусною моделлю SIMPACK та проаналізовано динамічну поведінку рухомого складу.

Комплексне експериментальне дослідження динамічної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування проведено в [10]. Розроблено два різних підходи: квазістатичний – із частотою збурення 0,05 Гц, за якого нехтують залежною від частоти поведінкою підвіски, але враховують зв'язок між жорсткістю на зсув і крен, і динамічний – із частотою збурення до 20 Гц, за якого частотно-залежна поведінка підвіски у вертикальному напрямку представлена за допомогою термодинамічної моделі, а також додатково врахована залежність параметрів поперечної жорсткості від навантаження.

У [15] використано чотири різні експериментальні методи для дослідження статичної та квазістатичної вертикальної жорсткості пневматичної ресори.

Вплив геометричних параметрів пневматичної ресори на її вертикальну жорсткість досліджено в [14]. Для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі проведено експериментальні дослідження за частоти збурення 0,125 Гц. Однак точність запропонованої математичної моделі погіршується для випадку значного об'єму додаткового резервуара.

У праці [16] розглянуто шість моделей пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування рухомого складу, які оцінено на основі порівняння з експериментами. Частотний діапазон експериментальних досліджень перебував у межах до 20 Гц з амплітудою деформування 4 мм. Установлено, що за частоти понад 2 Гц необхідно враховувати нелінійне в'язке демпфування.

Вплив роботи клапанів висоторегулювання та перепаду тиску між пневматичними ресорами на динамічні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування досліджено у [17] теоретичним та експериментальним шляхом. Результати показали необхідність врахування цих особливостей під час руху кривими

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ділянками малого радіуса з невеликими швидкостями руху. Крім цього, у роботі [21] досліджено вплив початкового кута нахилу важеля клапана висоторегулювання на дисбаланс вертикального навантаження від колісних пар рухомого складу на рейкову колію.

Проведений аналіз праць вказує на значну зацікавленість як науковців, так і практиків питаннями дослідження та встановлення динамічних характеристик пневматичної системи ресорного підвищення рухомого складу. Однак в експериментальних дослідженнях основним збурювальним фактором виступає синусоїдальна нерівність або крива ділянка залізничної колії. Відтак невирішеним залишається завдання дослідження особливостей деформування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного перевалу.

Особливий інтерес викликає деформування пневматичної ресори під час проїзду колеса із вусовика на сердечник та із сердечника на вусовик хрестовини стрілочного перевалу. Оскільки через специфіку конструкції та вертикальних і бокових зносів сердечника і вусовиків колесо рухомого складу проїжджає вертикальну нерівність. Це викликає значне динамічне додавання сил [3, 11] на рухомий склад, а відповідно, і пневматичну ресору.

Дослідження деформацій ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках під час руху стенда по хрестовині проведено експериментально. Для цього запропоновано рухомий стенд із пневматичною ресорою та спеціалізованим вимірювальним обладнанням. Розміщення стенда на хрестовині наведено на рис. 3.



Рис. 3. Стенд для дослідження деформування пневматичної ресори

Fig. 3. Test bench for studying the deformation of a pneumatic spring

Конструктивно стенд складається із несної конструкції – рами, яка встановлена на чотири рухомих колеса. До верхньої металевої пластини, яка жорстко з'єднана з рамою, чотирма високоміцними болтами прикріплено пневматичну ресору швидкісного рухомого складу. На ресору прикладено навантажувальний блок, що дозволяє візуалізувати її коливання під час руху по хрестовині стрілочного перевалу.

У результаті руху стенда по хрестовині відбувається деформування ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках. Для вимірювання деформацій використано високочастотні потенціометричні датчики лінійних переміщень, які встановлено у вертикальній та горизонтальній площинах відносно до ресори (рис. 4).



Рис. 4. Вигляд встановлених потенціометричних датчиків лінійних переміщень на пневматичній ресорі швидкісного рухомого складу

Fig. 4. View of the installed potentiometric linear displacement sensors on the pneumatic spring of high-speed rolling stock

Сигнал переміщень із потенціометричних датчиків зчитують за допомогою запрограмованого аналогово-цифрового перетворювача. Отримані дані через USB порт надходять на комп'ютер та накопичуються в його пам'яті.

Програма експериментальних досліджень деформування пневматичної ресори передбачала вимірювання деформацій у вертикальній та горизонтальній площині. При цьому вимірювання відбувалося під час руху стенда в прямому та зворотному у напрямках по хрестовині стрілочного перевалу. З метою отримання достовірних

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

значень деформацій пневматичної ресори, проведено по шість проїздів стенда в прямому та зворотному напрямках хрестовини. Під час кожного проїзду випробувального стенда записано деформації пневматичної ресори, а виміряні дані збережено в окремий файл на комп'ютері.

## Результати

На підставі натурних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу отримано записи її вертикальних (рис. 5–6) та горизонтальних (рис. 7–8) деформацій в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу.

На основі аналізу отриманих даних встановлено, що в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу у вертикальній площині є значно вищими за деформації у горизонтальній площині.

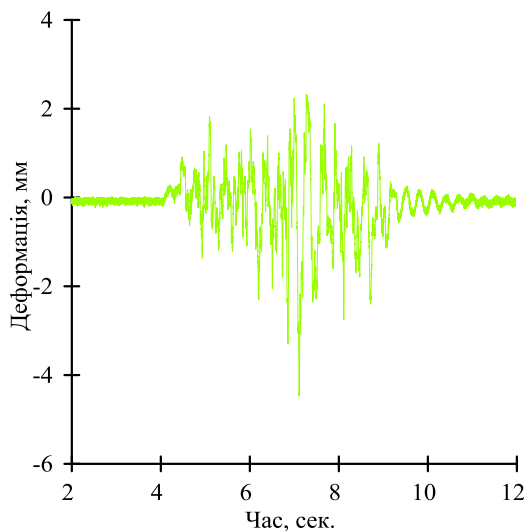


Рис. 5. Запис вертикальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу в прямому напрямку

Fig. 5. Recording of vertical deformations of the pneumatic spring in the conditions of movement along the crosshead of the switch translation in the forward direction

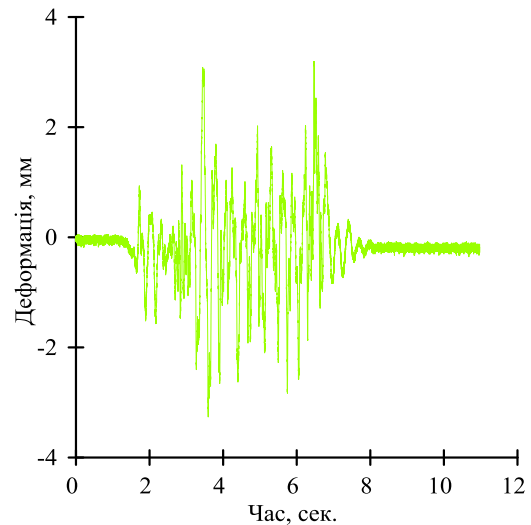


Рис. 6. Запис вертикальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу у зворотному напрямку

Fig. 6. Recording of vertical deformations of a pneumatic spring under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the opposite direction

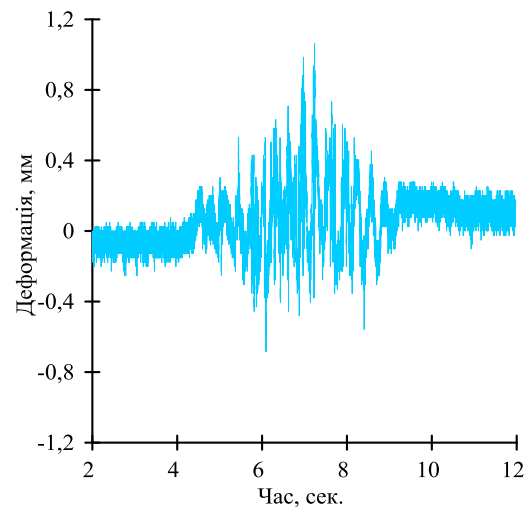


Рис. 7. Запис горизонтальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу у прямому напрямку

Fig. 7. Recording of horizontal deformations of a pneumatic spring under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the forward direction

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

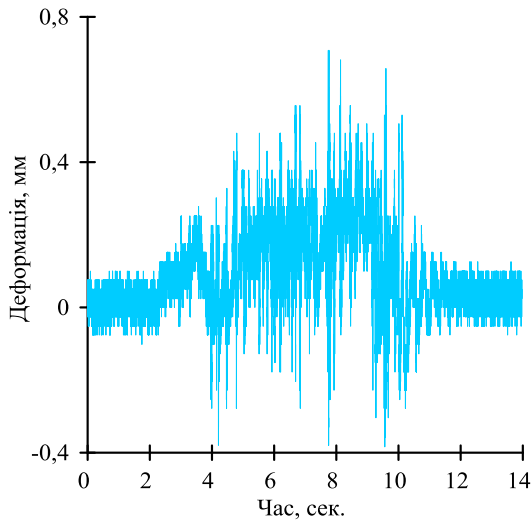


Рис. 8. Запис горизонтальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу у зворотному напрямку

Fig. 8. Recording of horizontal deformations of a pneumatic spring under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the opposite direction

Для порівняння максимальних і середніх значень вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори використаємо записи всіх дванадцяти проїздів випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу в прямому та зворотному напрямках (рис. 9–10).

Установлено, що під час проїзду випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу максимальні значення вертикальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу складають у разі прямого руху по стрілочному переводу – від 2,53 до 4,47 мм, а в разі зворотного руху – від 2,46 до 3,26 мм. У горизонтальному напрямку максимальні деформації такі: у разі прямого руху по хрестовині стрілочного переводу – від 0,86 до 1,06 мм, а в разі зворотного руху – від 0,68 до 0,80 мм.

Із рис. 9–10 встановлено, що середнє значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в прямому напрямку складає 3,15 мм, що на 9,98 % вище за середнє значення у зворотному напрямку руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу. У горизонтальному напрямку така різниця деформацій складає 25,1 %. Зазначена особливість пояснюється умовами руху колеса колісної пари рухомого складу по хрестовині стрілочного переводу.

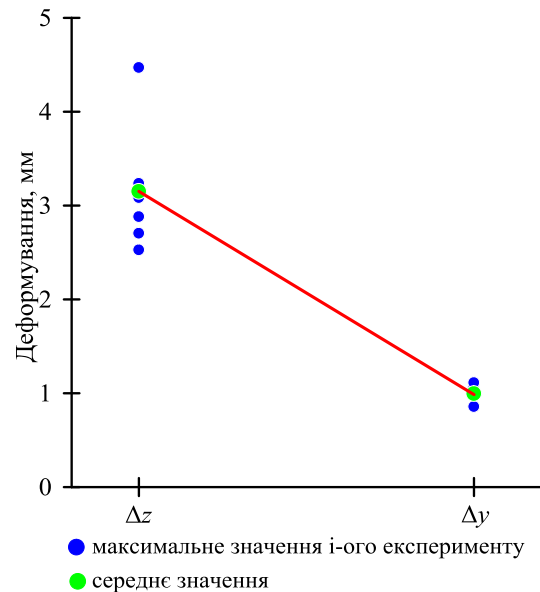


Рис. 9. Вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори під час руху по хрестовині стрілочного переводу у прямого напрямку

Fig. 9. Vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring during movement along the crosshead of a turnout in the forward direction

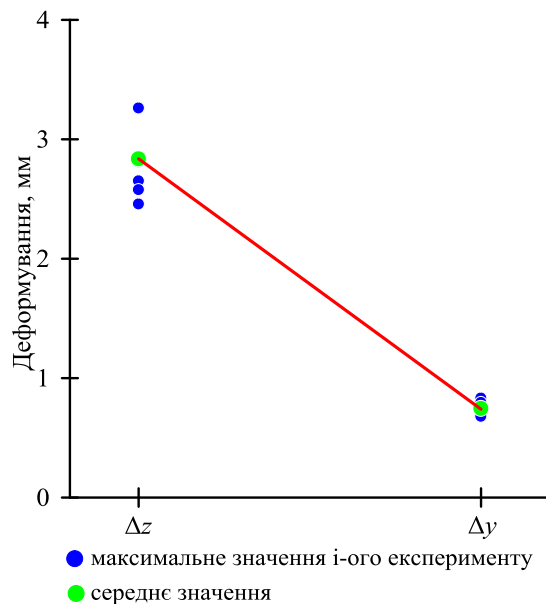


Рис. 10. Вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори під час руху по хрестовині стрілочного переводу у зворотному напрямку

Fig. 10. Vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring during movement along the crosshead of a turnout in the opposite direction

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Отже, дослідження динамічної поведінки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в подальшому дозволить перейти до визначення її динамічних характеристик у випадку взаємодії швидкісного рухомого складу з елементами стрілочного перевалу.

Із практичної точки зору це дозволить ще на етапі проектування швидкісного рухомого складу проводити визначення динамічних показників та показників безпеки руху для різних умов його експлуатації.

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше визначено вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного перевалу із врахуванням напрямку руху, прямого та зворотного. Визначення величин деформацій пневматичної ресори дозволить досліджувати її динамічні характеристики в різних умовах експлуатації рухомого складу, а на стадії його проектування обирати відповідні характеристики пневматичної

системи ресорного підвішування та визначати динамічні показники та показники безпеки руху рухомого складу.

### Висновки

1. Розроблено методологію динамічних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниці в умовах руху по хрестовині стрілочного перевалу і прямому та зворотному напрямках.

2. На основі отриманих експериментальних даних вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори встановлено, що її деформації у вертикальній площині є значно вищими за деформації в горизонтальній площині.

3. Установлено, що середнє значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в прямому напрямку складає 3,15 мм, що на 9,98 % вище за середнє значення у зворотному напрямку руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного перевалу. У горизонтальному напрямку така різниця деформацій пневматичної складає 25,1 %.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В. Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 53–63. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306143>
2. Кузишин А. Я., Костриця 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. Орловський А. М., Каленик К. Л., Ковальчук В. В. Дослідження поздовжнього профілю жорстких хрестовин на залізобетонних брусах. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. № 41. С. 130–135.
4. Alonso A., Giménez 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>
5. 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>
6. Berg M. A three-dimensional airspring model with friction and orifice damping. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 33. Iss. sup1. P. 528–539. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>
7. Bešter T., Oman S., Nagode M. Determining influential factors for an air spring fatigue life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2018. Vol. 42. Iss. 1. P. 284–294. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.12904>
8. Docquier N., Fiset P., Jeanmart H. Multiphysic 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>

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Docquier N., Fiset P., Jeanmart H. Model-based evaluation of railway pneumatic suspension. *Vehicle System Dynamics*. 2008. Vol. 46. Iss. sup1. P. 481–493. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110801993110>
10. Facchinetti A., Mazzola L., Alfi S., Bruni S. Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Iss. sup1. P. 429–449. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036>
11. Kovalchuk V., Bolzhelarskiy Y., Parneta B., Pentsak A., Petrenko O., Mudryy I. Evaluation of the stressed-strained state of crossings of the 1/11 type turnouts by the finite element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4. No. 7 (88). P. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107024>
12. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Kovalchuk V., Dovhanyuk S., Voznyak O. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>
13. Li F., Yang W., Ding Y. Simulation of Static Test of Air-Spring. *Advanced Materials Research*. 2009. Vol. 11–12. Iss. 1. P. 713–716. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.11-12.713>
14. Li X., He Y., Liu W., Wei Y. Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2015. Vol. 230. Iss. 4. P. 1172–1183. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715585370>
15. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51. Iss. 11. P. 1655–1673. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>
16. 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>
17. 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>
18. 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, № B 5. P. 499–508.
19. Sun J. Calculation of vertical stiffness of air spring with FEM. *4th ANSA & META International Conference*. 2011. P. 1–4.
20. Sun L., Li Z., Shen X., Zhu J. Simulation and test study on dynamic characteristic of air spring with auxiliary chamber. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 341–342. P. 391–394. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.391>
21. 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>
22. 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>
23. Zhu H., Yang J., Zhang Y. 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>, N. V. KOSTIV<sup>3</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

<sup>3</sup>Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. (032) 267 99 74, e-mail [nzkostiv@gmail.com](mailto:nzkostiv@gmail.com), ORCID 0009-0005-5832-9786

## Investigation of the Influence of a Turnout Cross on Vertical and Horizontal Deformations of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock

**Purpose.** The aim of the study is to determine the values of vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of high-speed rolling stock during the movement of the test setup along the cross of the switch in the forward and reverse directions. **Methodology.** To determine the deformations of the pneumatic spring, a special test bench consisting of a pneumatic spring and specialized measuring equipment was developed. The deformations of the air spring in the vertical and horizontal planes were measured using high-frequency potentiometric linear displacement sensors, the signals from which were read using a programmed analog-to-digital converter. To obtain reliable data on the deformations of the air spring, six passes of the test bench were made in the forward and reverse directions of the cross member. **Findings.** A methodology for dynamic testing of a pneumatic spring of high-speed rolling stock under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the forward and reverse directions was developed. The records of vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of high-speed rolling stock under the conditions of movement along the crossover of a switch were obtained. It is established that the deformations of the pneumatic spring in the vertical plane are higher than those in the horizontal plane. The average value of the vertical deformations of the pneumatic spring in the forward direction is 3.15 mm, which is 9.98 % higher than the average value in the opposite direction of the test unit's movement along the cross-section of the switch. In the horizontal direction, this difference in deformation of the air spring is 25.1 %. **Originality.** For the first time, the vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of high-speed rolling stock under the conditions of movement along the crossbar of a switch were determined, taking into account the direction of movement, forward and reverse. **Practical value.** Determining the values of deformations of the pneumatic spring will allow to study its dynamic characteristics in different operating conditions of rolling stock, and at the design stage to select the appropriate characteristics of the pneumatic spring suspension system and determine the dynamic and safety indicators of rolling stock.

*Key words:* pneumatic spring; deformation; turnout; cross member; forward motion; reverse motion

### REFERENCES

1. Kuzyshyn, A. Ya., & Kovalchuk, V. V. (2024). Experimental Study of the Regularities of Deformation of the Rubber Cord Shell of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock. *Science and Transport Progress*, 2(106), 53-63. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306143> (in Ukrainian)
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. Orlovskiy, A. M., Kalenyk, K. L., & Kovalchuk, V. V. (2012). Investigation of longitudinal profile of rigid frogs on reinforced concrete sleepers. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 41, 130-135. (in Ukrainian)
4. 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)
5. 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)
6. 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)
7. Bešter, T., Oman, S., & Nagode, M. (2018). Determining influential factors for an air spring fatigue life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 42(1), 284-294. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.12904> (in English)
8. Docquier, N., Fisette, P., & Jeanmart, H. (2008). Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*, 46(sup1), 481-493. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110801993110> (in English)
9. 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)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Facchinetti, A., Mazzola, L., Alfi, S., & Bruni, S. (2010). Mathematical modelling of the secondary airsprung suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*, 48(sup1), 429-449. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036> (in English)
11. Kovalchuk, V., Bolzhelarskyi, Y., Parneta, B., Pentsak, A., Petrenko, O., & Mudryy, I. (2017). Evaluation of the stressed-strained state of crossings of the 1/11 type turnouts by the finite element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(88)), 10-16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107024> (in English)
12. Kuzyshyn, A., Batig, A., Kostritsa, S., Sobolevska, J., Kovalchuk, V., Dovhanyuk, S., & Voznyak, O. (2018). Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences*, 234, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003> (in English)
13. Li, F. X., Yang, W. M., & Ding, Y. M. (2006). Simulation of Static Test of Air-Sprung. *Advanced Materials Research*, 11-12, 713-716. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.11-12.713> (in English)
14. Li, X., He, Y., Liu, W., & Wei, Y. (2015). Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(4), 1172-1183. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715585370> (in English)
15. Li, X., & Li, T. (2013). Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*, 51(11), 1655-1673. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984> (in English)
16. 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. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641> (in English)
17. 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)
18. 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)
19. Sun, J. (2011). Calculation of vertical stiffness of air spring with FEM. *4th ANSA & META International Conference*, 1-4. (in English)
20. Sun, L., Li, Z., Shen, X., & Zhu, J. (2013). Simulation and test study on dynamic characteristic of air spring with auxiliary chamber. *Applied Mechanics and Materials*, 341-342, 391-394. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.391> (in English)
21. 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. <https://doi.org/10.1177/1464419319867179> (in English)
22. 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)
23. 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: 20.05.2024

Прийнята до друку: 23.09.2024

## УДК 629.463.65:656.2.073.235

С. В. ПАНЧЕНКО<sup>1</sup>, А. О. ЛОВСЬКА<sup>2\*</sup>, М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ<sup>3, 4</sup>,  
П. В. РУКАВІШНИКОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Автоматика та комп'ютерне телекерування рухом поїздів», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 00, ел. пошта panchenko074@ukr.net, ORCID 0000-0002-7626-9933

<sup>2\*</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>3</sup>Каф. «Теоретична і будівельна механіка», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 31 25, ел. пошта pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>4</sup>Каф. будівельних конструкцій, Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, Суми, Україна, 40000, тел. +38 (0542)70 11 86, ел. пошта pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>5</sup>Каф. «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 21, ел. пошта Rukavishnikov@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-9670-3071

## Особливості проектування зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах

**Мета.** Основною метою роботи є висвітлення особливостей проектування конструкції зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах. **Методика.** Для безпечного перевезення контейнерів у піввагоні запропоновано використати зйомний модуль. Даний модуль працює за принципом проміжного адаптера між контейнером та кузовом піввагона. Вибір профілів виконання балок каркаса зйомного модуля здійснено за моментами опору їх складових. Для цього було побудовано стрижневу систему каркаса зйомного модуля та проведено його розрахунок із використанням програмного комплексу «Ліра – САПР». За максимальним згинальним моментом, що діє в каркасі модуля через момент опору, та відомими допустимими напруженнями підібрано профіль виконання балок каркаса. З урахуванням обраного профілю виконання каркаса побудовано його просторову модель та проведено розрахунок на міцність. Для розрахунків на міцність застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation. Розрахунок проведено для двох схем навантажень зйомного модуля: дія вертикального навантаження і дія вертикального та поздовжнього навантаження. **Результати.** На підставі проведеного розрахунку за визначеним значенням моменту опору обрано профіль виконання зйомного модуля – квадратна труба з висотою та шириною 300 мм та товщиною стінки 5 мм. Результати розрахунків на міцність зйомного модуля показали, що для випадку сприйняття ним вертикального навантаження максимальні напруження складають 112,5 МПа. Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах надбудов і дорівнюють близько 1 мм. Для випадку сприйняття зйомним модулем вертикального та поздовжнього навантажень максимальні напруження в його конструкції склали 287,6 МПа. Максимальні переміщення виникають у торцевій надбудові, розміщеній з боку прикладення навантаження до зйомного модуля. Ці переміщення склали 2,16 мм. Отже, міцність зйомного модуля для розглянутих схем навантажень забезпечується. **Наукова новизна.** Запропоновано науковий підхід до проектування конструкції зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування конструкцій транспортних засобів модульного типу, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

**Ключові слова:** залізничний транспорт; піввагон; адаптація конструкції; зйомний модуль; навантаженість конструкції; контейнерні перевезення

### Вступ

Транспортна галузь уже тривалий час є генератором розвитку економіки європейських країн. При цьому однією з найбільш перспективних складових транспортної галузі є заліз-

ничний транспорт [8, 9]. Утримання його конкурентоспроможності на ринку транспортних послуг зумовило впровадження в експлуатацію комбінованих транспортних систем, найбільш затребуваними серед яких є контейнерні [7].

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Перевезення контейнерів залізницею здійснюються на вагонах-платформах. Нестача вагонів-платформ в експлуатації викликає необхідність використання інших типів вагонів під контейнерні перевезення, наприклад, піввагонів (рис. 1).

*a – a*



*б – б*



Рис. 1. Перевезення контейнерів у піввагонах:

*a* – завантаження контейнерів у піввагон;  
*б* – розміщення контейнерів у піввагоні

Fig. 1. Transportation of containers in gondola cars:

*a* – loading containers into a gondola car;  
*b* – placement of containers in a gondola car

Це обґрунтовано відсутністю даху в напіввагоні, що дозволяє здійснювати його завантаження в нього контейнерів. Однак використання піввагонів для перевезення контейнерів потребує забезпечення надійної схеми їх взаємодії, адже піввагон не пристосований для цих цілей. Унаслідок податливості контейнера в піввагоні може мати місце пошкодження не тільки самого контейнера та вантажу який у ньому перевозять, а й кузова піввагона. Це не тільки спричинити необхідність позапланових видів ремонту транспортних засобів, а й може призвести до аварій. У випадку перевезень небезпечних вантажів це додатково загрожує й екологічній безпеці. Тому питання ситуаційної адаптації піввагонів до перевезень контейнерів є досить актуа-

льними та потребують дослідження, як і питання створення залізничного рухомого складу для перевезень контейнерів, а також удосконалення схем їх закріплень під час транспортування.

Так, наприклад, особливості модернізації вантажного вагона для перевезення контейнерів висвітлено в роботі [15]. Автори запропонували впровадити зйомну раму. Така рама призначена для розміщення 20 та 40-футових контейнерів, її кріплять до рами вагона. Доведено, що запропоновані рішення щодо використання зазначеної рами є ефективними. Однак автори обмежилися обґрунтуванням застосування запропонованої рами на вагоні-платформі.

Рішення щодо ситуаційної адаптації піввагонів до перевезень контейнерів наведено в роботі [10]. Запропоновано спеціальний зйомний модуль для закріплення контейнерів у піввагоні. Такий модуль є багатофункціональним, його можна використати для перевезень і інших типів вантажів. У статті наведено приклад його застосування для перевезень довгомірних вантажів. Однак автори не приділили уваги дослідженню міцності несної конструкції піввагона та контейнера з урахуванням використання такого модуля.

Особливості розрахунку на міцність підлоги 40-футового контейнера під час його перевезення водним транспортом розглянуто в роботі [14]. Ця робота має практичне значення, оскільки автори досліджували певний маршрут перевезень контейнерів. Запропоновано рекомендації щодо безпечної експлуатації цього типу контейнера за цим маршрутом. Однак ці рішення не є ефективними в разі його перевезення залізничним транспортом, зокрема в піввагонах.

У роботі [12] для адаптації транспортних засобів до перевезень контейнерів запропоновано конструкцію зйомного модуля типу FLAT RACK. Висвітлено результати розрахунку зйомного модуля на міцність за умови його використання на вагоні-платформі. Результати розрахунку довели доцільність запропонованої конструкції модуля. Разом з цим автори не досліджували можливість його використання для кріплення контейнерів у піввагонах.

Робота [11] присвячена визначенню навантаженості піввагона під час перевезення в ньому контейнерів. Наведено розрахунок на міц-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ність кузова вагона в разі сприйняття ним по-здовжніх навантажень від контейнерів через фітингові упори, приварені до підлоги. Запропоновано рішення щодо вдосконалення схеми закріплення контейнерів у піввагоні. Однак ці рішення запропоновано як концепти. У роботі не наведено прикладів реалізації цих рішень.

Для можливості застосування вагона-платформи під перевезення довгомірних вантажів у публікації [16] запропоновано конструкцію зйомного модуля. Особливістю такого модуля є наявність пружно-фрикційних зв'язків у рамі, що зменшує вертикальні навантаження, які діють на його конструкцію під час експлуатації. Конструкцію цього зйомного модуля можна пристосувати і до перевезень контейнерів, однак автори не досліджували ці питання.

У роботі [4] проведено дослідження міцності кузова універсального піввагона під час перевезення в ньому контейнерів. Результати проведених розрахунків показали, що перевезення контейнерів у піввагоні за досліджуваної схеми навантажень кузова є можливими. Водночас зазначено, що в умовах наднормових режимів, тобто коли поздовжня сила на передні упори в разі «ривку» буде перевищувати 2,5 МН [2], величина напружень у кузові піввагона може перевищувати допустиме значення. Однак рішень щодо зменшення цих напружень автори не запропонували.

Особливості модернізації несної конструкції вагона для можливості перевезень у ньому контейнерів висвітлено в публікації [13]. Наведено результати експериментальних досліджень міцності рами вагона у випадку маневрового співударяння. Установлено, що запропонована модернізація є доцільною. Але ці дослідження проведено для вагона-платформи. Тобто автори не досліджували доцільність подібної модернізації піввагона.

Проведений аналіз літературних джерел доводить, що питання перевезень контейнерів залізницею є досить актуальним, але для можливості залучення до таких перевезень піввагонів необхідно провести додаткові дослідження.

### Мета

Основною метою роботи є висвітлення особливостей проектування конструкції зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- визначити профіль виконання конструкції зйомного модуля;
- провести розрахунок на міцність конструкції зйомного модуля.

### Методика

Для безпечного перевезення контейнерів у піввагоні запропоновано використання зйомного модуля. Цей модуль працює за принципом проміжного адаптера між контейнером та кузовом піввагона (рис. 2).

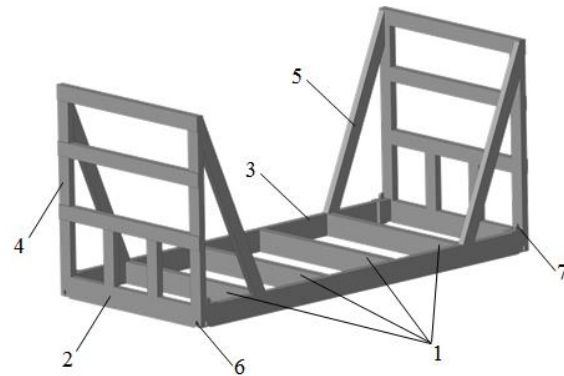


Рис. 2. Модуль для кріплення контейнерів у піввагоні

Fig. 2. Module for fastening containers in a gondola car

Модуль складається з рами, яку утворюють поперечні балки 1, кінцеві балки 2, поздовжні балки 3, торцеві надбудови 4 та розкоси 5. Модуль в піввагоні оснащений кутковими фітингами 6 для кріплення. Контейнери кріплять у модулі через фітингові упори 7. Кріплення самого модуля в піввагоні здійснюють через фітингові упори, які розміщують на підлозі піввагона.

Розміщення контейнерів у піввагоні з урахуванням застосування зйомного модуля для їх кріплення наведено на рис. 3.

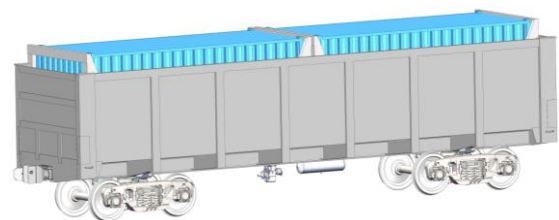


Рис. 3. Розміщення контейнерів у піввагоні

Fig. 3. Placement of containers in a gondola car

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вибір профілів виконання балок каркаса зйомного модуля здійснено за їх моментами опору. Для цього було побудовано стрижневу систему каркаса зйомного модуля (рис. 4, 5) та проведено його розрахунок із використанням програмного комплексу «Ліра – САПР» [1]. Цей комплекс дозволяє визначати внутрішні фактори, що діють у стрижнях у випадку прикладання до них зовнішнього навантаження. Як зовнішнє навантаження враховано поздовжнє, яке діє на торцеву надбудову зйомного модуля (рис. 6). Оскільки рама зйомного модуля прилягає до підлоги піввагона, то вертикальне навантаження, яке діє на неї, не враховано.

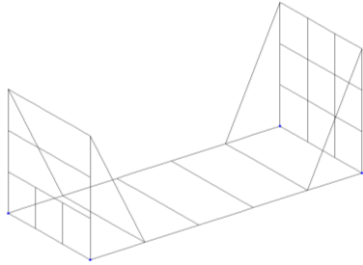


Рис. 4. Стрижнева система каркаса зйомного модуля

Fig. 4. Rod system of the removable module frame

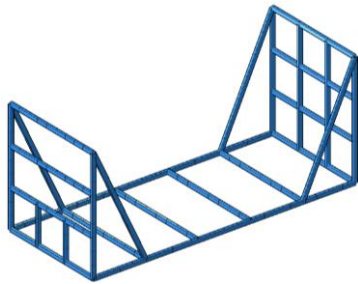


Рис. 5. Просторова модель каркаса зйомного модуля з нанесенням сітки

Fig. 5. Spatial model of the frame of the removable module with a grid

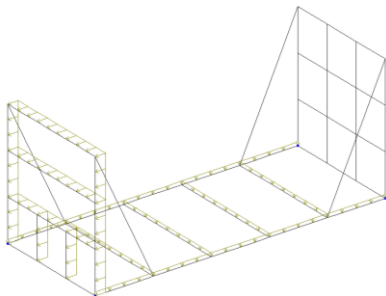


Рис. 6. Розрахункова схема каркаса

Fig. 6. Design scheme of the frame

У зонах упирання каркаса на фітінгові упори встановлено жорсткі зв'язки, тобто таким чином змодельовано взаємодію зйомного модуля з піввагоном.

На підставі проведених розрахунків у ПК «Ліра – САПР» отримано епюри моментів, які діють у складових каркаса зйомного модуля (рис. 7–9). Помаранчевим кольором показано додатні значення силових факторів, а блакитним – від'ємні.

Відносно поздовжньої осі зйомного модуля діє крутний момент (рис. 7). Його максимальне значення спостерігається в нижньому поясі торцевої надбудови і дорівнює 8,176 кН·м.

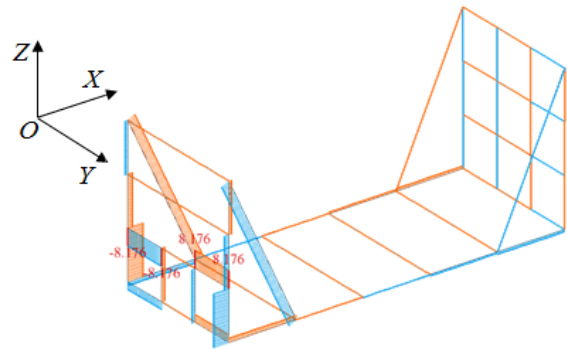


Рис. 7. Епюра крутних моментів, що діють у каркасі відносно осі X (кН·м)

Fig. 7. Epure of torques, acting in the frame relative to the X-axis (kN·m)

Відносно поперечної осі зйомного модуля діє згинальний момент. Його максимальне значення спостерігається в зонах взаємодії розкосів із поздовжніми балками і складає 206,7 кН·м (рис. 8).

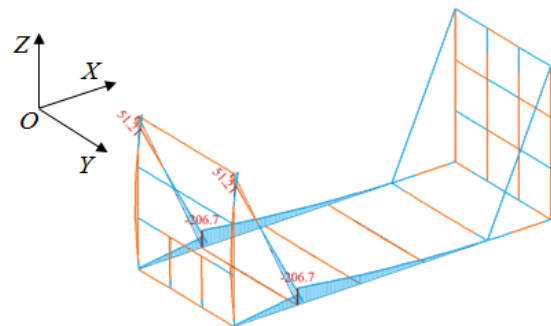


Рис. 8. Епюра згинальних моментів, що діють у каркасі відносно осі Y (кН·м)

Fig. 8. Bending moment diagram, acting in the frame relative to the Y-axis (kN·m)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Відносно вертикальної осі на зйомний модуль діє згинальний момент із максимальним значенням  $21,52 \text{ кН} \cdot \text{м}$  (рис. 9).

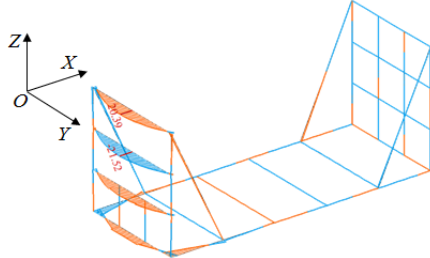


Рис. 9. Епюра згинальних моментів, що діють у каркасі відносно осі  $Z$  ( $\text{кН} \cdot \text{м}$ )

Fig. 9. Bending moment diagram, acting in the frame relative to the  $Z$ -axis ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

Також на конструкцію зйомного модуля діють поздовжні (рис. 10) та поперечні сили (рис. 11, 12). Максимальне значення поздовжньої сили спостерігається в розкосах і дорівнює  $246 \text{ кН}$  (рис. 10).

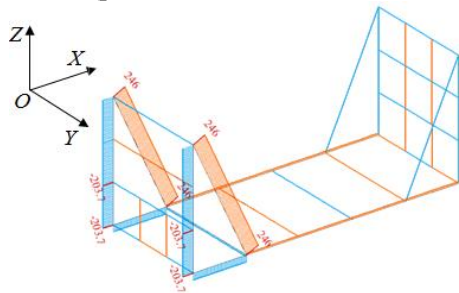


Рис. 10. Епюра поздовжніх сил, що діють у каркасі ( $\text{кН}$ )

Fig. 10. Diagram of longitudinal forces acting in the frame ( $\text{kN}$ )

Максимальні поперечні сили відносно осі  $Y$  виникають у нижньому поясі торцевої надбудови і складають  $42,28 \text{ кН}$  (рис. 11).

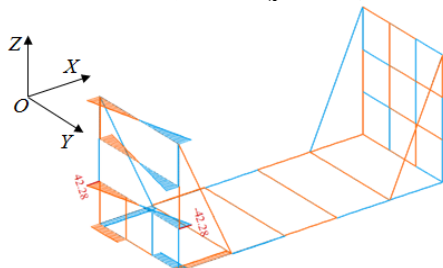


Рис. 11. Епюра поперечних сил, що діють у каркасі відносно осі  $Y$  ( $\text{кН}$ )

Fig. 11. Diagram of transverse forces acting in the frame relative to the  $Y$ -axis ( $\text{kN}$ )

Відносно осі  $Z$  максимальне значення поперечної сили виникає у вертикальній стійці торцевої надбудови і складає  $105,1 \text{ кН}$  (рис. 12).

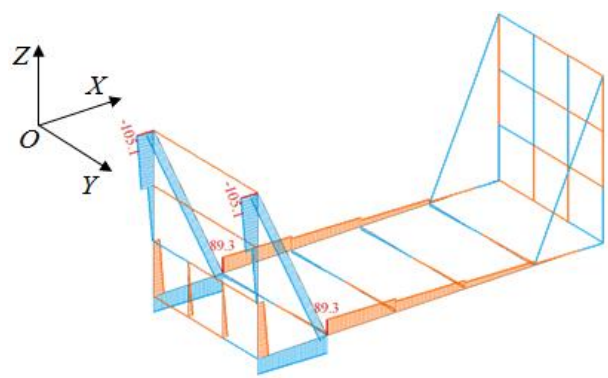


Рис. 12. Епюра поперечних сил, що діють у каркасі відносно осі  $Z$  ( $\text{кН}$ )

Fig. 12. Diagram of transverse forces acting in the frame relative to the  $Z$ -axis ( $\text{kN}$ )

Під дією зовнішнього навантаження конструкція зйомного модуля буде випробовувати деформації. На рис. 13 наведено ці деформації у збільшеному масштабі. Тобто з урахуванням дії зовнішніх навантажень на модуль його рама «вгинається» вгору, а торцеві надбудови – навоні.

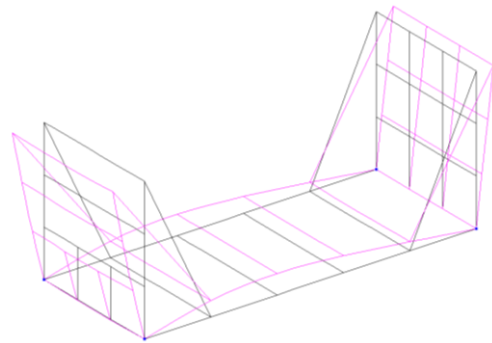


Рис. 13. Деформації в конструкції зйомного модуля

Fig. 13. Deformations in the structure of the removable module

За максимальним згинальним моментом  $M$ , що діє в каркасі зйомного модуля через момент опору  $W$ , та відомими допустимими напруженнями  $[\sigma]$  підібрано профіль виконання балок каркаса. Для цього застосовано відомий вираз:  $W = M/[\sigma]$  [6]. Враховано, що модуль складається зі сталі марки 09Г2С, яка має  $[\sigma] = 310,5 \text{ МПа}$  [2]. Тоді  $W = 546,8 \text{ см}^3$ .

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За цим моментом опору як профіль виконання каркаса запропоновано застосувати квадратну трубу (рис. 14 [3]).

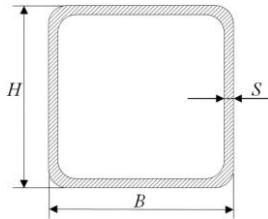


Рис. 14. Переріз труби:

$H$  – висота;  $B$  – ширина;  $S$  – товщина стінки

Figure 14. Section of the pipe:

$H$  – height;  $B$  – width;  $S$  – wall thickness

Цей профіль є досить зручним і з технологічних міркувань, а саме монтажу й обслуговування. Параметри профілів, які обрано за сортаментом прямокутних труб, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Параметри профілів виконання каркаса

Table 1

## Parameters of the frame execution profiles

Висота та ширина профілю, мм	Момент опору, см <sup>3</sup>	Товщина стінки, мм	Маса 1 м, кг
250	547,19	7,5	55,59
300	561,13	5,0	45,81

З аналізу даних, наведених у табл. 1, можна зробити висновок, що більш раціональним є застосування профілю висотою та шириною 300 мм.

## Результати

З урахуванням обраного профілю виконання каркаса побудовано його просторову модель та проведено розрахунок на міцність. Для розрахунків на міцність застосовано метод скінченних елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation [5]. Під час створення моделі не враховано зварювальні шви між окремими складовими каркаса. Скінченно-елементу модель каркаса утворено тетраедрами (рис. 15), оскільки сітку нанесено на твердому тілі. Число тетраедрів, які утворюють сітку, розраховано графоаналітично. З урахуванням цього кількість вузлів складала – 40 688, а елементів – 110 331. Най-

більший елемент мав розмір 100 мм, найменший – 20 мм. Розрахунок реалізовано для двох схем навантажень зйомного модуля:

- дія вертикального навантаження (рис. 16);
- дія вертикального та поздовжнього навантажень (рис. 17).

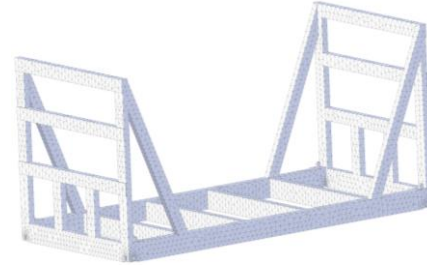


Рис. 15. Скінченно-елементна модель зйомного модуля

Fig. 15. Finite element model of the removable module

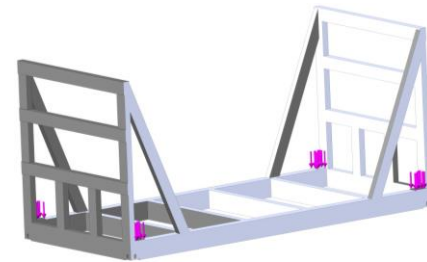


Рис. 16. Розрахункова схема зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального навантаження

Fig. 16. Design scheme of the removable module when it is subjected to a vertical load

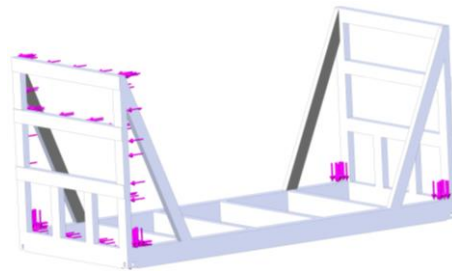


Рис. 17. Розрахункова схема зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального та поздовжнього навантажень

Fig. 17. Design scheme of the removable module when it is subjected to vertical and longitudinal loads

За проведеними розрахунками для випадку сприйняття зйомним модулем вертикального навантаження найбільш навантаженими зонами його конструкції є зони взаємодії поперечних балок із поздовжніми (рис. 18).

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

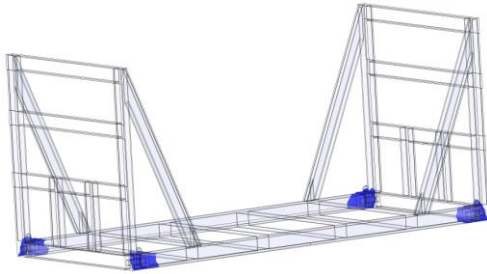


Рис. 18. Найбільш навантажені зони конструкції зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального навантаження

Fig. 18. The most loaded zones of the removable module structure in case of vertical load perception

Максимальні напруження, які виникають у цих зонах, склали 112,5 МПа (рис. 19), що нижче за допустимі для марки сталі 09Г2С [2], яка є типовою для виготовлення транспортних засобів залізничного призначення.

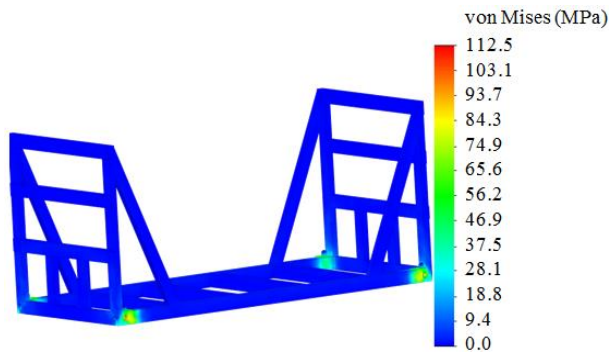


Рис. 19. Напружений стан зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального навантаження

Fig. 19. Stressed state of the removable module when it is subjected to a vertical load

Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах торцевих надбудов і дорівнюють близько 1 мм (рис. 20).

Для випадку сприйняття зйомним модулем вертикального та поздовжнього навантажень найбільш навантаженими зонами його конструкції є зони взаємодії поперечних балок із поздовжніми, які розміщені з боку навантажених фітингів (рис. 21).

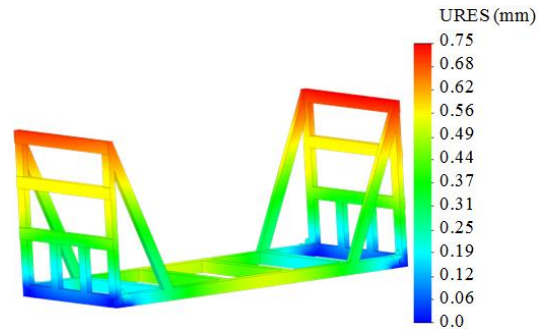


Рис. 20. Переміщення у вузлах зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального навантаження

Fig. 20. Displacement in the assemblies of the removable module when it is subjected to a vertical load

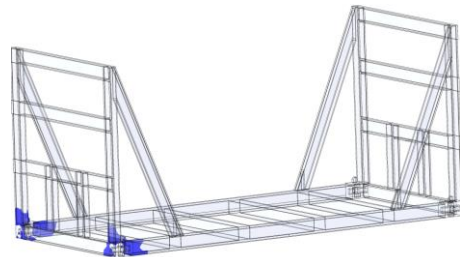


Рис. 21. Найбільш навантажені зони конструкції зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального та поздовжнього навантажень

Fig. 21. The most loaded zones of the removable module structure when it is subjected to vertical and longitudinal loads

Максимальні напруження, які виникають у цих зонах, склали 287,6 МПа (рис. 22), що нижче за допустимі на 7,4 % [2].

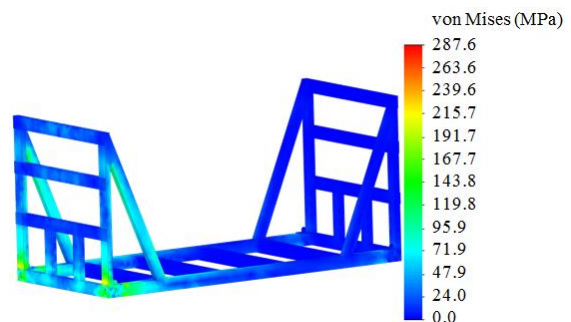


Рис. 22. Напружений стан зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального та поздовжнього навантажень

Fig. 22. Stressed state of the removable module when it is subjected to vertical and longitudinal loads

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Максимальні переміщення в конструкції виникають у торцевій надбудові, розміщеній з боку прикладення навантаження до зйомного модуля. Ці переміщення склали 2,16 мм (рис. 23).

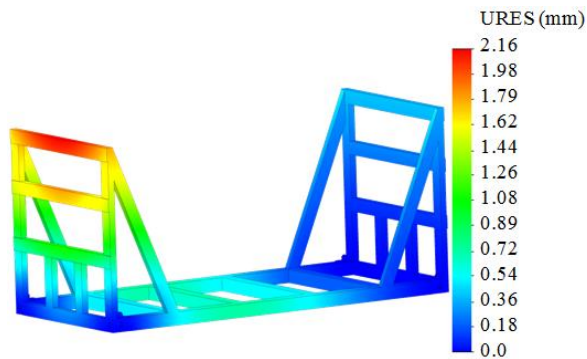


Рис. 23. Переміщення у вузлах зйомного модуля в разі сприйняття ним вертикального та поздовжнього навантажень

Fig. 23. Displacements in the assemblies of the removable module when it is subjected to vertical and longitudinal loads

Результати проведених розрахунків доводять доцільність вибору обраного профілю виконання зйомного модуля.

На подальших етапах дослідження передбачено визначити міцність зйомного модуля в разі наднормових режимів експлуатації. Також буде розглянуто можливі приклади використання зйомного модуля для перевезень інших типів вантажів, що підвищить його затребуваність в експлуатації.

#### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано науковий підхід до проектування конструкції зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування конструкцій транспортних засобів модульного типу, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

#### Висновки

1. Визначено профіль виконання конструкції зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах. При цьому його конструкцію розглянуто як стрижневу систему. На підставі проведеного розрахунку за визначеним значенням моменту опору обрано профіль виконання зйомного модуля – квадратна труба з висотою та шириною 300 мм та товщиною стінки 5 мм.

2. Проведено розрахунок на міцність конструкції зйомного модуля. До уваги взято два режими навантаження його конструкції: дія вертикального навантаження, дія вертикального та поздовжнього навантажень. Установлено, що для випадку сприйняття модулем вертикального навантаження максимальні напруження в його конструкції складають 112,5 МПа. Ці напруження зосереджені в зонах взаємодії поперечних балок із поздовжніми. Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах надбудов і дорівнюють близько 1 мм.

Для випадку сприйняття зйомним модулем вертикального та поздовжнього навантажень максимальні напруження в його конструкції склали 287,6 МПа. Ці напруження зафіксовано в зонах взаємодії поперечних балок із поздовжніми, які розміщені з боку навантажених фітінгів. Максимальні переміщення в конструкції виникають у торцевій надбудові, розміщеній з боку прикладення навантаження до зйомного модуля. Ці переміщення склали 2,16 мм. Отже, міцність зйомного модуля для розглянутих схем навантажень забезпечується.

#### Подяка

Дана публікація підготовлена у рамках виконання стипендіальної роботи Верховної Ради України для молодих учених – докторів наук «Ефективні конструктивні рішення залізничного рухомого складу для перевезень стратегічних вантажів» (№ДР 0124U003906).

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барабаш М. С., Сорока М. М., Сур'янінов М. Г. *Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра – САПР*. Одеса : Екологія, 2018. 248 с.
2. *ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)*. [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. ДСТУ 8940:2019. Труби сталеві профільні. Технічні умови. [Чинний від 01.01.2021]. Київ : ДП «Укр-НДНЦ», 2021.
4. Ловська А. О., Діжо Я., Рибін А. В., Рукавішников П. В. Особливості визначення показників міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2024. № 26. С. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2024-26-9>
5. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. *Інженерна графіка в SolidWorks*: навчальний посібник. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.
6. Шваб'юк В. І. *Опір матеріалів*. Київ : Знання, 2016. 400 с.
7. Caban J., Nieoczum A., Gardyński L. Strength analysis of a container semi-truck frame. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 127, Article 105487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105487>
8. Cuartero J., Miravete A., Sanz R. Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash. *International Journal of Crashworthiness*. 2011. Vol. 16. Iss. 1. P. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163>
9. Dižo J. Analysis of a Goods Wagon Running on a Railway Test Track. *Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 16. Iss. 4. P. 667–672. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/mt/16/4/667>
10. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Pavliuchenkov M., Kravchenko O., Solčanský S. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 15. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13158605>
11. Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Skurikhin D., Harušinec J., Suchánek A., Ishchuk V. The Strength of the Open Wagon Body when Transporting Containers. *Proceedings of 27th International Scientific Conference. Transport Means*. 2023. P. 440–445.
12. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Pavliuchenkov M., Kravchenko K. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13010079>
13. Reidemeister A. H., Kalashnyk V. A., Shykunov A. A. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Science Transport Progress. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2016. № 2 (62). P. 148–156. DOI: <https://doi.org/15802/stp2016/67334>
14. Rzeczycki A., Wiśnicki B. Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81–90. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.252.81>
15. Shaposhnyk V., Shykunov O., Reidemeister A., Leontii M., Potapenko O. Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 7 (109). P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090>
16. Vatulia G., Lovska A., Pavliuchenkov M., Nerubatskyi V., Okorokov A., Hordiienko D., Vernigora R., Zhuravel I. Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 6 No. 7 (120). P. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855>

S. V. PANCHENKO<sup>1</sup>, A. O. LOVSKA<sup>2\*</sup>, M. V. PAVLIUCHENKOV<sup>3,4</sup>,  
P. V. RUKAVISHNYKOV<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Automation and Computer Telecontrol of Trains», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 00, e-mail panchenko074@ukr.net, ORCID 0000-0002-7626-9933

<sup>2\*</sup>Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>3</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 31 25, e-mail pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>4</sup>Dep. Building constructions, Sumy National Agrarian University, Gerasim Kondratiev St., 160, Sumy, Ukraine, 40000, tel. +38 (0542) 70 11 86, e-mail pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>5</sup>Dep. «Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 21, e-mail Rukavishnikov@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-9670-3071

## Design Features of a Removable Module for Securing Containers in Gondola Cars

**Purpose.** The main purpose of the study is to highlight the design features of the design of a removable module for fastening containers in gondola cars. **Methodology.** For the safe transportation of containers in gondola cars, it is proposed to use a removable module. This module operates on the principle of an intermediate adapter between the container and the open wagon body. The choice of the profiles of the beams of the frame of the removable module was made according to the moments of resistance of their components. To do this, the core system of the removable module frame was constructed and calculated using the Lira CAD software package. According to the maximum bending moment acting in the module frame due to the moment of resistance and the known permissible stresses, the profile of the frame beams was selected. Taking into account the selected profile of the frame, its spatial model was built and strength calculations were performed. The finite element method implemented in SolidWorks Simulation was used for strength calculations. The calculation was carried out for two loading schemes of the removable module: the effect of a vertical load and the effect of vertical and longitudinal loads. **Findings.** Based on the calculation, the profile of the removable module was selected according to the determined value of the resistance moment - a square pipe with a height and width of 300 mm and a wall thickness of 5 mm. The results of the strength calculations of the removable module showed that for the case of its perception of a vertical load, the maximum stresses are 112.5 MPa. The maximum displacements occur in the upper parts of the superstructures and are about 1 mm. For the case of the vertical and longitudinal loads perceived by the removable module, the maximum stresses in its structure amounted to 287.6 MPa. The maximum displacements occurred in the end superstructure located on the side of the load applied to the removable module. These displacements amounted to 2.16 mm. Thus, the strength of the removable module for the considered loading schemes is ensured. **Originality.** A scientific approach to the design of a removable module for securing containers in gondola cars is proposed. **Practical value.** The research will contribute to the creation of recommendations for the design of modular-type vehicle structures, as well as to improving the efficiency of railway transport operation.

**Keywords:** railway transport; gondola cars; design adaptation; removable module; structure load; container transportation

### REFERENCES

1. Barabash, M. S., Soroka, M. M., & Surianinov, M. H. (2018). *Neliniina budivselna mekhanika z PK Lira-SAPR*. Odesa : Ekolohiia. (in Ukrainian)
2. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi (nasamohidnih)*, 250 DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian)
3. *Truby stalevi profilni. Tekhnichni umovy*, DSTU 8940:2019 (2021). (in Ukrainian)
4. Lovska, A. O., Dizho, Y., Rybin, A. V., & Rukavishnykov, P. V. (2024). Features of determining the strength indicators of an open wagon body when transporting containers in it. *Scientific News of Dahl University*, 26, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2024-26-9> (in Ukrainian)
5. Pustiulha, S. I., Samostian, V. R. & Klak, Yu. V. (2018). *Inzhenerna hrafika v SolidWorks: navchalnyi posibnyk*. Lutsk: Vezha. (in Ukrainian)
6. Shvabiuk, V. I. (2016). *Opir materialiv*. Kyiv: Znannia. (in Ukrainian)
7. Caban, J., Nieoczym, A., & Gardyński, L. (2021). Strength analysis of a container semi-truck frame. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105487> (in English)
8. Cuartero, J., Miravete, A., & Sanz, R. (2011). Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash. *International Journal of Crashworthiness*, 16(1), 41-47. DOI: <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163> (in English)
9. Dižo, J. (2016). Analysis of a Goods Wagon Running on a Railway Test Track. *Manufacturing Technology*, 16(4), 667-672. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/mt/16/4/667> (in English)
10. Gerlici, J., Lovska, A., Vatulia, G., Pavliuchenkov, M., Kravchenko, O., & Solčanský, S. (2023). Situational Adaptation of the Open Wagon Body to Container Transportation. *Applied Sciences*, 13(15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605> (in English)
11. Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Skurikhin, D., Harušinec, J., Suchánek, A., & Ishchuk, V. (2023). The Strength of the Open Wagon Body when Transporting Containers. *Proceedings of 27th International Scientific Conference*. Transport Means, 440-445. (in English)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

13. Panchenko, S., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Pavliuchenkov, M., & Kravchenko, K. (2022). The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. *Applied Sciences*, 13(1), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13010079> (in English)
14. Reidemeister, A. H., Kalashnyk, V. A., & Shykunov, A. A. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Science Transport Progress. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2(62), 148-156. DOI: <https://doi.org/15802/stp2016/67334> (in English)
15. Rzeczycki, A., & Wiśnicki, B. (2016). Strength Analysis of Shipping Container Floor with Gooseneck Tunnel under Heavy Cargo Load. *Solid State Phenomena*, 252, 81–90. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.252.81> (in English)
16. Shaposhnyk, V., Shykunov, O., Reidemeister, A., Muradian, L., & Potapenko, O. (2021). Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(109)), 14-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090> (in English)
17. Vatulia, G., Lovska, A., Pavliuchenkov, M., Nerubatskyi, V., Okorokov, A., Hordiienko, D., Vernigora, R., & Zhuravel, I. (2022). Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(120)), 21-29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855> (in English)

Надійшла до редколегії: 01.05.2024

Прийнята до друку: 05.09.2024

## ЗМІСТ

### ***ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА***

**М. М. БІЛЯЄВ, В. В. КОЗАЧИНА**

Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах ..... 5

**В. В. БІЛЯЄВА, І. В. КАЛАШНІКОВ, О. В. БЕРЛОВ, О. І. ГУБІН, В. А. КОЗАЧИНА**

Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації на залізничній станції ..... 15

### ***ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ***

**Є. М. ЧУПРИНА, А. М. МУХА, О. І. БОНДАР, С. В. ПЛАКСІН**

Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля ..... 23

### ***ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ***

**О. В. ГОРБОВА, Д. В. БОГУЦЬКИЙ**

Контекстний аналіз сайту ..... 32

### ***МАШИНОБУДУВАННЯ***

**В. М. БОГОМАЗ, В. Й. НАГАЧЕВСЬКИЙ, М. В. ПРИЙМАК**

Аналіз впливу параметрів експлуатації машин на технічні характеристики елеватора в пункті чищення та миття парку техніким ..... 40

**О. С. КУРОП'ЯТНИК, О. Л. КРАСНОЩОК**

Уточнення методики визначення характеристик канатних доріг ..... 51

### ***РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ***

**А. Я. КУЗИШИН, В. В. КОВАЛЬЧУК, Н. В. КОСТІВ**

Дослідження впливу хрестовини стрілочного переводу на вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу ..... 63

**С. В. ПАНЧЕНКО, А. О. ЛОВСЬКА, М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ, П. В. РУКАВІШНИКОВ**

Особливості проєктування зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах ..... 73

# CONTENTS

## ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

**M. M. BILIAIEV, V. V. KOZACHYNA**  
Modeling of Filtration and Heat and Mass Transfer Processes  
in Groundwater..... 5

**V. V. BILIAIEVA, I. V. KALASHNIKOV,  
O. V. BERLOV, O. I. GUBIN, V. A. KOZACHYNA**  
Predicting the Consequences of an Emergency at a Railway  
Station ..... 15

## ***ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES***

**Y. M. CHUPRYNA, A. M. MUKHA, O. I. BONDAR,  
S. V. PLAKSIN**  
Research of the Primary Electric Energy Storage System  
of a Traction Photovoltaic Module..... 23

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING***

**O. V. GORBOVA, D. V. BOHUTSKYI**  
Contextual Analysis of the Site ..... 32

## ***MECHANICAL ENGINEERING***

**V. M. BOHOMAZ, V. J. NAGACHEVSKYI,  
M. V. PRYIMAK**  
Analysis of the Influence of Machine Operation Parameters  
on the Technical Characteristics of the Elevator in the Point  
of Cleaning and Washing of the Equipment Park..... 40

**O. S. KUROIATNYK, O. L. KRASNOSHCHOK**  
Clarification of the Methodology for Determining  
the Characteristics of Cable Cars..... 51

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**A. YA. KUZYSHYN, V. V. KOVALCHUK,  
N. V. KOSTIV**  
Investigation of the Influence of a Turnout Cross on Vertical  
and Horizontal Deformations of a Pneumatic Spring  
of High-Speed Rolling Stock..... 63

**S. V. PANCHENKO, A. O. LOVSKA,  
M. V. PAVLIUCHENKOV, P. V. RUKAVISHNIKOV**  
Design Features of a Removable Module for Securing  
Containers in Gondola Cars..... 73

## 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/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.**

№ 3 (107) 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. 10,23. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

**Український державний університет науки і технологій**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* stp.journal@ust.edu.ua

*Друк:*

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.**

=

**SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

No. 3 (107) 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 10,23. Circulation 100. Order no. 02/03

**Ukrainian State University of Science and Technologies**

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r.267, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* stp.journal@ust.edu.ua

*Printing*

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

