



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



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 1(109)

---

• 2025 •

Український державний університет науки і технологій

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 1 (109) 2025

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

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

Дніпро

2025

Засновник:  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ  
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА  
ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

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

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:**

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

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р.  
(До 28.09.2023 р.: Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України, свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.)  
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).  
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 26.03.2025 р., протокол № 10

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

Ukrainian State University of Science and Technologies

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU**

=

**SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

**Scientific journal**

**No. 1 (109) 2025**

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

*Automated and Telematic Systems on Transport*

*Ecology and Industrial Safety*

*Economics and Management*

*Operation and Repair of Transport Means*

*Electric Transport, Power Systems and Complexes*

*Railroad and Roadway Network*

*Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling*

*Material Science*

*Mechanical Engineering*

*Rolling Stock and Train Traction*

*Transport Construction*

Dnipro

2025

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief  
Deputy Chief Editor  
Executive Editor

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

*EDITORIAL BOARD MEMBERS:*

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan 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 26.03.2025, Protocol no. 10

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

Address  
of Founder

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

Edition is being published since 1936:

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

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 628.31: 519.87

M. M. BILIAIEV<sup>1</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>2\*</sup>, M. V. KYRYCHENKO<sup>3</sup>, M. O. SKURATOV<sup>4</sup>,  
A. O. CHIRKOV<sup>5</sup>, H. K. FILONENKO<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail 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, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>3</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail 980810x@gmail.com, ORCID 0000-0002-9025-9184.

<sup>4</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail skuratovmihail@gmail.com, ORCID 0009-0002-3056-3448

<sup>5</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail anton.chirkov.hydro@gmail.com, ORCID 0009-0005-4326-2881

<sup>6</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail filo.gen@icloud.com, ORCID 0009-0009-3393-1876

### Mathematical models for water treatment problems

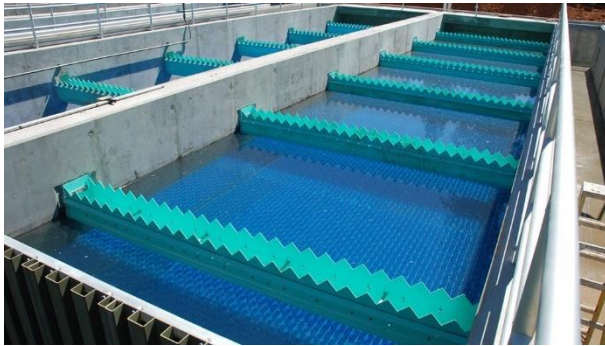
**Purpose.** Assessing the efficiency of water treatment in different structures is a problem of big importance. To solve this a problem, it is necessary to have mathematical models that allow to quickly obtain data on the cleaning effect in different structures. The aim of the work is to develop numerical models to determine the efficiency of water treatment in an aeration tanks, settlers and mixers. **Methodology.** For mathematical modeling of the process of water treatment in a bioreactor, balance equations were used. These equations allow to determine concentrations of substrate, activated sludge and dissolved oxygen in s structure. The Monod model is used to calculate the substrate oxidation process. To study effectiveness of water treatment process in vertical settler Euler's equation were used with convective-diffusive equation. To simulate reagent mixing in mixer equation of potential and convective-diffusive equation were used. To solve governing equations finite- difference schemes of splitting were used. **Findings.** A tool for theoretical assessment mass transfer processes in aeration tank, vertical settler, mixer was developed. **Originality.** Effective numerical models to simulate water treatment in bioreactor, vertical settler, mixer were developed. Fundamental equations of Fluid Dynamics and Mass Transfer were used to build the models. Proposed models can be used in practice at the stage of «sketch designing». The models take into account the main physical parameters which influence the process of Mass Transfer and are quick computing. **Practical value.** The constructed mathematical model can be useful during the reconstruction and designing structures for water treatment. Computer programs have been developed to carry out numerical experiment. The results of a computer experiment are presented.

*Key words:* water treatment; aeration tank; settler; mixer; mathematical modelling; water use

#### Introduction

The problem of water treatment is very important in the field of water use. Water treatment requires the use of various structures operating under different load conditions reagent mixer, air

tanks, settlers, etc (Fig. 1–3) [2–3, 5–14]. The use of these structures requires application of efficient mathematical models. In practice for water treatment empirical, analytical models [2, 3, 5, 6] and numerical models [1, 9–11] are used.

Fig. 1. Biological filter (<https://cutt.ly/fe5McbC7>)Fig. 2. Aeration tank (<https://cutt.ly/ue5MWnqx>)Fig. 3. Settler (<https://cutt.ly/Oe5ME8xR>)

It should be emphasized that for practice it is important to have quick computing numerical models. It is important that these models must take into account the most important physical factors. Such models are called “screening models” and are an effective tool in designing.

### Purpose

The objective of this paper is development of numerical models to simulate mass transfer processes in bioreactors, settlers, mixers.

### Methodology

#### *Modeling biological wastewater treatment.*

To describe the biological wastewater treatment process in the aeration tank the following equations are used [1, 13]:

$$\frac{dX}{dt} = Q(t) \cdot X_{in}(t) - Q(t) \cdot X + \mu \cdot X - K_d \cdot X; \quad (1)$$

$$\frac{dDO}{dt} = Q(t) \cdot DO_{in}(t) - Q(t) \cdot DO(t) + K_{La}(DO_{max} - DO) - \frac{K_0 \mu X}{Y}; \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = Q(t) \cdot S_{in}(t) - Q(t) \cdot S(t) - \frac{\mu X}{Y}; \quad (3)$$

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{S + K_s} \cdot \frac{DO}{k_{DO} + DO}, \quad (4)$$

where  $t$  – time;  $Q(t)$  – wastewater flow;  $X_{in}(t)$  – concentration of activated sludge entering the aeration tank;  $S_{in}$  – the concentration of the substrate entering the aeration tank;  $K_d$  – coefficient that takes into account the rate of biomass extinction;  $DO$  – oxygen concentration in wastewater;  $DO_{max}$  – the maximum value of oxygen concentration in wastewater;  $DO_{in}$  – oxygen concentration in wastewater entering the reactor;  $K_0$ ,  $K_s$ ,  $K_{La}$ ,  $\mu_{max}$ ,  $k_{DO}$ ,  $Y$  – parameters [13].

Equations (1)–(3) express the law of conservation of mass for substrate, dissolved oxygen and activated sludge in the reactor. Equation (4) shows the relationship between the biomass growth rate in the bioreactor as a function of the dissolved oxygen concentration and the substrate concentration in the bioreactor.

For the system of equations (1)–(3) it is necessary to set the initial conditions at  $t=0$ :

$$X = X_0; S = S_0; DO = DO_0.$$

Modeling equations (1)–(3) make it possible to determine how the concentration of the substrate (impurity) in the bioreactor, as well as dissolved oxygen and activated sludge, changes over time.

To solve governing equations Euler’s method was used, so difference equations were as follows:

$$X^{n+1} = X^n + dt \cdot Q_w(t^n) \cdot X_{in}^n(t^n) - dt \cdot Q_w(t^n) \cdot X^n + dt \cdot \mu^n \cdot X^n, \quad (5)$$

$$S^{n+1} = S^n + dt \cdot Q_w(t^n) \cdot S_{in}^n - dt \cdot Q_w(t^n) \cdot S_{in}^n(t) - dt \cdot \frac{\mu^n}{Y \cdot W} X^{n+1}, \quad (6)$$

$$DO^{n+1} = DO^n + dt \cdot Q_w(t^n) \cdot DO_{in}^n - dt \cdot Q_w(t^n) \cdot DO^n(t) - dt \cdot \frac{K_o \mu^n}{Y \cdot W} X^{n+1}, \quad (7)$$

where  $Q_w = \frac{Q}{W}$ .

Coding of numerical model was carried out using FORTRAN.

#### Modeling water treatment in Settler.

To study effectiveness of wastewater treatment process in vertical settler the following equation was used:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_g)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (8)$$

where  $C$  – pollutant concentration in wastewater which is treated in vertical settler;  $u$ ,  $v$  – components of velocity vector;  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  – diffusion coefficients;  $w_g$  – Stocks's velocity of fallout.

Boundary conditions are as follows:

1) at inlet boundary:

$$C = C_{in},$$

where  $C_{in}$  is known concentration in wastewater;

2) at outlet boundary:

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

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

3) at the solid surfaces: the boundary condition was as follows:

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

The initial condition is  $C = C_0$ , where  $C_0$  – known concentration.

To construct numerical model of pollutant dispersion, equation (8) is split as follows:

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (10)$$

Further, the following transformation were made:

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\mu_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-\mu_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1},$$

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

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

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

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

After these transformations, the following finite difference scheme was used to solve equation (6):

– at the first step:

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

– at the second step:

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

Finite difference scheme to integrate equation (7) has the following view

– at the first step:

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

– at the second step:

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

To integrate equation (5) it is necessary to know the velocity inside settler. To solve this problem the following governing equations were used:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

where  $\omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$  – vorticity;  $\psi$  – flow function.

Velocity components are determined as follows:

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

Boundary and initial conditions are described in [4].

To solve equation of vorticity transfer two-steps scheme of splitting was used:

– at the first step:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1/2} + \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j}^{n+1/2} - u_{i+1,j}^+ \omega_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j-1}^+ \omega_{i,j-1}}{\Delta y} = 0;$$

– at the second step:

$$\frac{\omega_{ij}^{n+1} - \omega_{ij}^{n+1/2}}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j-1}^- \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = 0.$$

To solve equation for flow function, it was written in the following form:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega,$$

where  $\eta$  – «fictitious» time.

Further, the following scheme of splitting was used:

– at the first step:

$$\frac{\psi_{ij}^{n+1/4} - \psi_{ij}^n}{\Delta t} = \frac{\overline{\psi_{ij}}}{2};$$

– at the second step:

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

– at the third step:

$$\frac{\psi_{i,j}^{n+3/4} - \psi_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{\psi_{i+1,j}^{n+3/4} - \psi_{i,j}^{n+3/4}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1}^{n+3/4} - \psi_{i,j}^{n+3/4}}{\Delta y^2};$$

– at the fourth step:

$$\frac{\psi_{ij}^{n+1} - \psi_{ij}^{n+3/4}}{\Delta t} = \frac{\overline{\omega_{i,j}}}{2},$$

where  $\overline{\omega_{i,j}} = \frac{1}{4}(\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j+1} + \omega_{i-1,j-1} + \omega_{i,j-1})$ .

Computational procedure is finished when the following condition is fulfilled:

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

where  $\varepsilon = 0.001$ ,  $n$  – iteration number.

To compute vorticity at the corner points special procedure was used [4]. Velocity components were calculated as follows:

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

Velocity components were used when numerical integration of equation (5) was carried out.

#### Modeling reagent transfer in mixer.

To simulate the process of reagent dispersion in mixer two governing equations were used:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_g)C}{\partial y} = \\ = -kC + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + Q\delta(x - x_i)\delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial uR}{\partial x} + \frac{\partial vR}{\partial y} = \\ = kC + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial R}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

where  $C$  – insoluble reagent concentration in water;  $R$  – dissolved reagent concentration in water;  $k$  – coefficient of dissolution rate;  $u, v$  – components of water velocity vector;  $w_g$  – gravity fallout speed;  $\mu_x, \mu_y$  – diffusion coefficients;  $Q$  – reagent rate supply into mixer;  $x_i, y_i$  – coordinates of reagent supply.

Boundary conditions for equation (13) and equation (14) are similar to the boundary conditions for equation (8).

Flow in the mixer was simulated using model of potential flow. In this case the governing equation was:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (15)$$

where  $P$  is velocity potential.

Components of velocity vector are determined as follows:

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

Boundary conditions are:

1. At inlet boundary:  $\frac{\partial P}{\partial x} = V_0$ , where  $V_0$  – known velocity.
2. At outlet boundary:  $P = \text{Const.}$
3. At the solid boundaries:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ ,  $n$  – normal to the solid surface.

Method of equations numerical integration is considered only for equation (14), because equation (13) and equation (14) are equivalent from mathematical point of view, both are convective-diffusive equations.

Firstly equation (14) was split as follows:

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial uR}{\partial x} + \frac{\partial vR}{\partial y} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial R}{\partial y} \right), \quad (16)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = kC. \quad (17)$$

Finite difference scheme for equation (15) is written as follows:

– at the first step:

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

– at the second step:

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

where  $L_x^+, L_y^+, L_x^-, L_y^-$  are finite-difference operators which were mentioned above.

To solve equation (16) two steps scheme of conditional approximation was used:

– at the first step:

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

– at the second step:

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

Euler’s method was used for equation (17) integration.

FORTRAN was used for coding equations of all described numerical models.

### Findings

Below are the results of model problem solution for vertical settler. The aim of simulation was to be ensure that developed models can model mass transfer in regions with comprehensive geometrical form without losing stability.

Four Scenarios were considered for vertical settler:

1. Scenario # 1: vertical settler, no additional elements inside (Fig. 4).

2. Scenario # 2: vertical settler with additional element: short plate (Fig. 5).

3. Scenario # 3: vertical settler with additional element: long plate (Fig. 6).

4. Scenario # 4: vertical settler with two additional elements (Fig. 7).

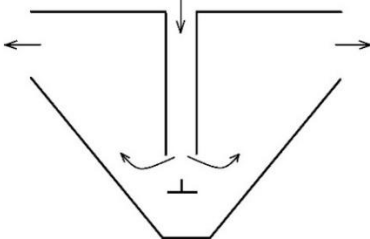


Fig. 4. Sketch of computational region, Scenario #1, no additional elements in settler

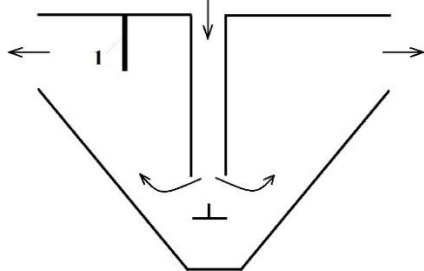


Fig. 5. Sketch of computational region, Scenario #2, short plate

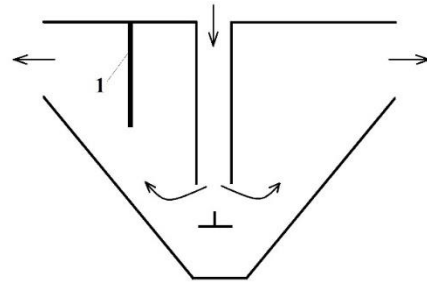


Fig. 6. Sketch of computational region, Scenario #3, long plate

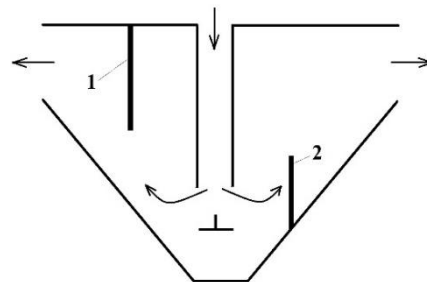


Fig. 7. Sketch of computational region, Scenario #4, two additional plates

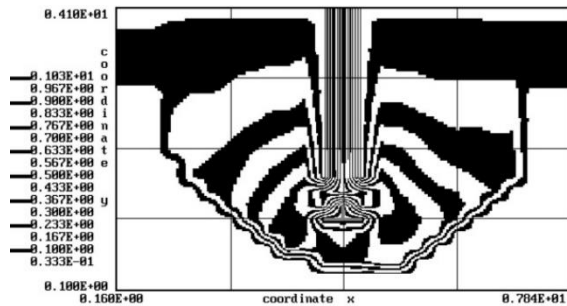


Fig.8 Pollutant concentration inside settler, Scenario #1

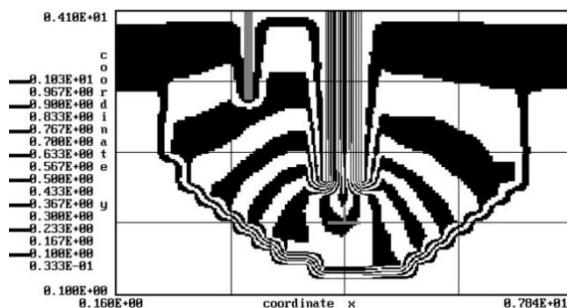


Fig. 9. Pollutant concentration inside settler, Scenario #2

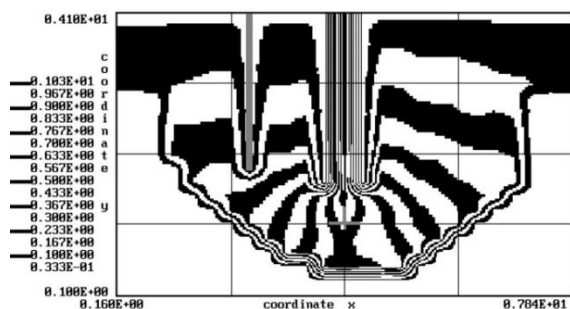


Fig. 10. Pollutant concentration inside settler, Scenario #3

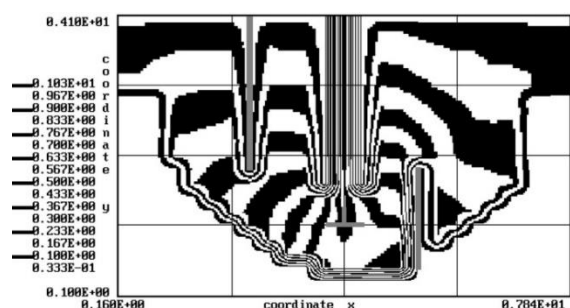


Fig. 11. Pollutant concentration inside settler, Scenario #4

As can be seen from the figures above, additional elements inside the settler causes deformation of pollutant concentration field. Near these elements regions with high gradient concentrations were formed.

Loss of stability was not occurred during the computational experiment. The calculation time was 3 s for each scenario.

### Originality and Practical value

The article discusses effective numerical models to simulate water treatment in bioreactor, vertical settler, mixer. Fundamental equations of Fluid Dynamics and Mass Transfer were used to build the models.

The proposed models can be used in practice at the stage of «sketch designing». The models take into account the main physical parameters wch influence the process of Mass Transfer and are quick computing.

### Conclusions

1. The article proposes effective numerical models for analyzing the processes of mass transfer in different structures for water treatment.
2. The models will be useful at the stage of «sketch designing».
3. In the future, this scientific direction should be developed in the field of developing three-dimensional numerical models for analyzing the processes of mass transfer.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Біляєв М. М., Козачина В. А., Гунько О. Ю., Лемеш М. В. *Комп'ютерне моделювання процесів біологічної очистки стічних вод*. Дніпро : Журфонд, 2023. 186 с.
2. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення*. Київ : Укреліотех, 2010. 272 с.
3. Гіроль М. М., Гіроль А. М., Гіроль А. М. *Технології водовідведення промислових підприємств*. Рівне : НУВГП, 2013. 625 с.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
5. Ковальчук В. А. *Очистка стічних вод*. Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповіді Національної академії наук України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
7. Alharbi A. O. M The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94. Iss. 2. P. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411>
8. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>
9. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81. Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>

10. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Iss. 5. P. 04020028-1–04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689)
11. Gao H., Stenstrom MK Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92. Iss. 6. P. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>
12. Mocanu C. R., Mihaillescu R. Numerical Simulation of Wastewater Treatment Aeration Processes. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 74. Iss. 2. P. 191–198.
13. Pereda M., Zamarrano J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (Corfu, 20-23 June 2011). Corfu, 2011. P. 1128–1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>
14. Vilanova R., Rojas J. D., Alfaro V. M. Digital Control of a Waste Water Treatment Plant. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2011. Vol. 6, No. 2. P. 367–374. DOI: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2011.2.2184>

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1</sup>, В. А. КОЗАЧІНА<sup>2\*</sup>, М. В. КИРИЧЕНКО<sup>3</sup>, М. О. СКУРАТОВ<sup>4</sup>,  
А. О. ЧІРКОВ<sup>5</sup>, Г. К. ФІЛОНЕНКО<sup>6</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>3</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [980810x@gmail.com](mailto:980810x@gmail.com), ORCID 0000-0002-9025-9184.

<sup>4</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [skuratovmihail@gmail.com](mailto:skuratovmihail@gmail.com), ORCID 0009-0002-3056-3448

<sup>5</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [anton.chirkov.hydro@gmail.com](mailto:anton.chirkov.hydro@gmail.com), ORCID 0009-0005-4326-2881

<sup>6</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [filo.gen@icloud.com](mailto:filo.gen@icloud.com), ORCID 0009-0009-3393-1876

## Математичні моделі в задачах очищення води

**Мета.** Оцінка ефективності очищення води в різних спорудах є актуальною проблемою. Для її вирішення необхідно мати математичні моделі, які дозволяють швидко отримувати дані про ефективність очищення в різних спорудах. Основною метою роботи є розробка чисельних моделей для визначення ефективності очищення води в аеротенках, відстійниках та змішувачах. **Методика.** Для математичного моделювання процесу очищення води в біореакторі використано балансові рівняння. Ці рівняння дозволяють визначити концентрації субстрату, активного мулу та розчиненого кисню в його складі. Для розрахунку процесу окислення субстрату використано модель Моно. Під час дослідження ефективності процесу очищення води у вертикальному відстійнику рівняння Ейлера було доповнено конвективно-дифузійним рівнянням. Для моделювання перемішування реагентів у змішувачі використано рівняння потенціалу та конвективно-дифузійне рівняння. Розв'язання моделювальних рівнянь здійснено за допомогою скінченнорізницевої схем розщеплення. **Результати.** Розроблено інструмент для теоретичної оцінки масообмінних процесів в аеротенку, вертикальному відстійнику, змішувачі. **Наукова новизна.** Розроблено ефективні чисельні моделі для визначення процесів очищення води в біореакторі, вертикальному відстійнику, змішувачі. Для побудови моделей взято фундаментальні рівняння гідродинаміки та масообміну. Запропоновані моделі можуть бути використані на практиці на стадії «ескізного проектування». Моделі враховують основні фізичні параметри, які впливають на процес масообміну, і є швидкими в обчисленні. **Практична значимість.** Побудовані матема-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

тичні моделі можуть бути корисними під час реконструкції та проектування споруд для водопідготовки та очистки стічних вод. Розроблено комп'ютерні програми для проведення чисельного експерименту. Представлено результати комп'ютерного експерименту.

*Ключові слова:* водопідготовка; аеротенк; відстійник; змішувач; математичне моделювання; водокористування

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Kozachyna, V. A., Gunko, O. Yu., & Lemesh, M. V. (2023). *Kompiuterne modeliuвання protsesiv biologichnoi ochystky stichnykh vod*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Vasylenko, O. A., Grabovsky, P. O., Larkina, G. M., Polishchuk, O. V., & Progulny, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia*. Kyiv: IVNVKP «Ukrgeiotek». (in Ukrainian)
3. Hirol, M. M., Hirol, A. M., & Hirol, A. M. (2013). *Tekhnologii vodovidvedennia promyslovykh pidpriemstv*. Rivne: NUWEE. (in Ukrainian)
4. Zgurovsky, M. Z., Skopetsky, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelirovaniye rasprostraneniya zahriazneniia v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Kovalchuk, V. A. (2002). *Ochystka stichnykh vod*. Rivne: «Rivnenska drukarnia». (in Ukrainian)
6. Oliinyk, O. Ya., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347-348. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411> (in English)
8. Babaei, A. A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and kinetic evaluation of upflow anaerobic biofilm reactor for nitrogen removal from wastewater by Anammox process. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
9. Dapelo, D., & Bridgeman, J. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)
10. Gao, H., & Stenstrom M. K. (2019). Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)
11. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(5), 04020028-1–04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001689) (in English)
12. Mocanu, C. R., & Mihaillescu, R. (2012). Numerical Simulation of Wastewater Treatment Aeration Processes. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 74(2), 191-198. (in English)
13. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011, June). Agent-based modeling of an activated sludge process in a batch reactor. In *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (pp. 1128-1133). Corfu, Greece. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)
14. Vilanova, R., Rojas, J. D., & Alfaro, V. M. (2011). Digital Control of a Waste Water Treatment Plant. *International Journal of Computers Communications & Control*, 6(2), 367-374. DOI: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2011.2.2184> (in English)

Надійшла до редколегії: 20.11.2024

Прийнята до друку: 21.03.2025

## УДК 631.234:697.35

В. В. БІЛЯЄВА<sup>1\*</sup>, С. А. ЩЕРБИНА<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 101 19 78, ел. пошта vikabelyeva604@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

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

## Експрес-модель для аналізу процесу нагрівання ґрунту в теплиці

**Мета.** Організація штучного підігрівання ґрунту в теплиці відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного вирощування рослин, адже оптимальна температура ґрунту є ключовим чинником цього процесу. Саме нагрівання необхідно проводити так, щоб забезпечити певний діапазон температур у ґрунті, зокрема в зоні розташування кореневої системи рослин. Процес нагрівання ґрунту залежить від конкретних умов експлуатації теплиць. Для організації раціонального та енергоощадного процесу необхідно заздалегідь, на етапі проектування системи нагрівання, визначити параметри її роботи. Ефективним методом розв'язку цієї задачі є використання математичних моделей. Основна мета роботи полягає в розробці одновимірної експрес-моделі для оцінювання процесу прогрівання ґрунту в теплиці. **Методика.** Для дослідження динаміки штучного нагрівання ґрунту використано рівняння теплопровідності. Чисельне інтегрування моделювального рівняння здійснено за допомогою скінченнорізницевої схеми сумарної апроксимації. **Результати.** Розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої можна проводити обчислювальний експеримент із визначення динаміки штучного нагрівання ґрунту в теплиці. Наведено результати чисельного моделювання. **Наукова новизна.** Розроблено одновимірну чисельну модель для аналізу штучного прогрівання ґрунту в теплиці. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння теплопровідності та дозволяє швидко визначити динаміку формування теплових полів у ґрунті як у разі роботи нагрівального елемента, так і в разі його вимикання. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може стати корисним інструментом на етапі проектування систем штучного нагрівання ґрунту. Вона забезпечує наукове обґрунтування параметрів нагрівальних систем та енергоефективних режимів їх роботи. Модель дозволяє швидко оцінювати динаміку формування теплових полів у ґрунті як під час роботи нагрівального елемента, так і після його вимикання. Для практичного застосування чисельної моделі потрібна лише стандартна вхідна інформація. Контроль динаміки нагрівання ґрунту відкриває можливості для оптимального управління режимами роботи системи нагрівання.

*Ключові слова:* енергозбереження; теплопровідність; прогрівання ґрунту; теплиця; математичне моделювання

## Вступ

Оптимальна температура ґрунту – ключовий фактор успішного вирощування рослин у теплицях. Навіть за умови задовільного повітряного опалення недостатнє прогрівання ґрунту може сповільнити ріст кореневої системи, вплинути на засвоєння поживних речовин і знизити врожайність. У [2] було розглянуто різні методи опалення теплиць, їх переваги та недоліки. У цій статті увагу буде зосереджено саме на аналізі процесу нагрівання ґрунту в теплиці.

Температура ґрунту прямо впливає на фізіологічні процеси рослин. За занадто холодної

температури ґрунту уповільнюється ріст коренів, погіршується поглинання води і поживних речовин, зростає ризик виникнення захворювань. Крім того, недостатнє прогрівання може призвести до затримки розвитку рослин і зниження якості врожаю. Наприклад, теплолюбні культури, такі як томати та огірки, особливо чутливі до температурних коливань у зоні кореневої системи.

З іншого боку, правильне прогрівання ґрунту дозволяє створити сприятливі умови для кореневої системи, сприяє активному обміну речовин і збільшенню врожайності. Це особливо важливо в регіонах із холодним кліматом або в міжсезоння [6, 7].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Прогрівання ґрунту можна реалізувати різними способами залежно від технічних можливостей, бюджету та потреб теплиці. Розглянемо ці способи більш детально.

**Електричні системи опалення.** Одним із найбільш популярних методів є кабельні системи опалення. Вони являють собою електричні нагрівальні елементи, укладені під шар ґрунту. Кабелі дозволяють рівномірно розподілити тепло і підтримувати задану температуру. Такий метод відрізняється простотою встановлення і точністю управління, але вимагає значних енерговитрат (рис. 1).



Рис. 1. Електрична система опалення теплиці  
<https://eco-obogrev.com>

Fig. 1. Electric greenhouse heating system  
<https://eco-obogrev.com>

**Водяні системи (гідралічне опалення).** Водяні системи працюють за принципом теплої підлоги, коли нагріта вода циркулює по трубках, укладених під ґрунт. Цей метод ефективний для великих теплиць і дозволяє використовувати відновлювані джерела енергії, такі як сонячні колектори. Проте встановлення системи вимагає значних початкових витрат.

Універсальність методу водяного підігрівання ґрунту теплиць полягає в широкому виборі енергоносіїв, адже нагрівати теплоносієм можна чим завгодно, що більш вигідно. Тут важливо правильно укласти петлі нагрівальних контурів із труб та організувати підтримання необхідної температури ґрунту. Найзручніше використовувати в парниковій споруді газовий котел, він може нагрівати воду до 35–40 °С, що є проблемою для твердопаливних котлів.

А найбільш комфортне рішення – провести до теплиці опалювальні магістралі від домашнього котла за умови достатньої його потужності (рис. 2).

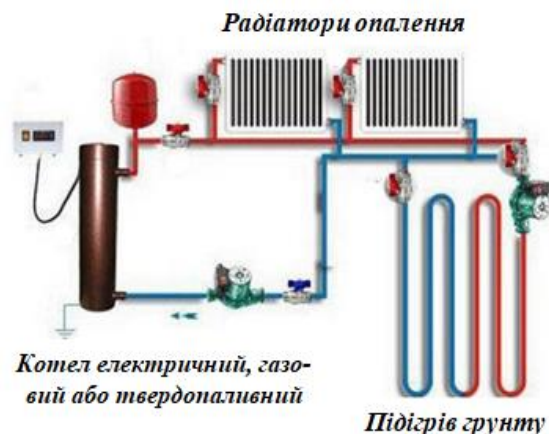


Рис. 2. Схема водяного підігрівання ґрунту в теплиці  
<https://eco-obogrev.com>

Fig. 2. Scheme of water heating of soil in a greenhouse  
<https://eco-obogrev.com>

**Теплові мати та плівки.** Теплові мати та плівки є компактним і доступним рішенням для невеликих теплиць (рис. 3).



Рис. 3. Прогрівання кореневої системи рослин інфрачервоною плівкою  
<https://leto.net.ua>

Fig. 3. Warming the root system of plants with infrared film  
<https://leto.net.ua>

Їхні переваги – легкість монтажу, мобільність і низьке енергоспоживання. Проте такі системи підходять переважно для точкового опалення (рис. 4).

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА



Рис. 4. Підігрівання кореневої системи під лотками з рослинами  
<https://leto.net.ua>

Fig. 4. Heating the root system under plant trays  
<https://leto.net.ua>

*Альтернативні методи.* Біопаливо та органічні підстилки – це традиційний, але ефективний спосіб підтримання тепла в ґрунті. Під час розкладання органіки виділяє тепло і насичує ґрунт корисними речовинами. За активної діяльності мікроорганізмів температура органічного матеріалу, тобто біопалива, може досягати 72 °С. Тому процес розкладу мікроорганізмами біопалива з виділенням тепла умовно називають горінням. Гаряче біопаливо використовують у захищеному ґрунті для підтримки температури на потрібному рівні. Як біопаливо використовують гній тварин в суміші з пухкими матеріалами (солома, тирса, торф верховий, листя), відходи деревообробних підприємств (кора, стружка, тирса, тріски), міське сміття, що складається з органічних відходів.

Для розігрівання біопалива його перебивають і пухко укладають у штабель, у середину якого закладають гарячі камені або палаюче вугілля. Через 3–5 днів біопаливо має почати горіти, і його можна використовувати для обігрівання захищеного ґрунту.

Під час використання біопалива слід мати на увазі, що максимуму температура всередині штабеля досягає приблизно через тиждень після його розігрівання, потім вона поступово знижується. Проте виділення тепла може тривати протягом 2–3 місяців і більше (рис. 5).

Також можливе використання сонячної енергії для підігрівання – встановлення сонячних батарей або колекторів.



Рис. 5. Облаштування парника з обігрівом гарячим біопаливом  
<https://teplitca.kiev.ua>

Fig. 5. Arrangement of a greenhouse heated with hot biofuel  
<https://teplitca.kiev.ua>

Кожен із розглянутих методів має свої особливості. Наприклад, електричні кабелі забезпечують високу точність контролю температури, але їх експлуатація обходиться дорого. Водяні системи підходять для великих господарств, але потребують професійного монтажу. Теплові мати прості у використанні, проте обмежені в потужності. Альтернативні методи є більш екологічними, але їх ефективність залежить від зовнішніх умов.

Під час вибору системи опалення ґрунту слід враховувати розміри теплиці, тип вирощуваних культур, клімат регіону та бюджет. Для невеликих теплиць підійдуть теплові мати або кабелі. У великих господарствах краще використовувати водяні системи або комбінувати кілька методів. Також важливо правильно налаштувати й обслуговувати обладнання, щоб уникнути перевитрат енергії та поломок.

Крім того, сучасні технології дозволяють мінімізувати вплив на навколишнє середовище. Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, робить процес опалення більш екологічним. Біопаливо та органічні методи допомагають скоротити викиди вуглекислого газу і поліпшити структуру ґрунту.

Немає сумнівів, що прогрівання ґрунту – це невід’ємна частина ефективного вирощування рослин у теплицях. Правильно підібрана система опалення допомагає захистити кореневу систему, прискорити ріст рослин і підвищити

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

врожайність. Вибір відповідного методу залежить від багатьох факторів, але головне – це турбота про рослини і прагнення до сталого розвитку сільського господарства. Поєднання сучасних технологій та екологічних рішень стане запорукою успішного і стабільного виробництва [8, 9].

Для наукового обґрунтування параметрів системи опалення теплиць необхідно вирішити низку важливих завдань, серед яких особливу увагу слід приділити оптимізації обігрівання ґрунту [10]. Це зумовлено тим, що для нормального розвитку кореневої системи рослин необхідно підтримувати температуру в певному діапазоні. Дотримання цього температурного режиму позитивно впливає на урожайність. Водночас ефективний обігрів ґрунту дозволяє зменшити енергоспоживання підприємства та знизити собівартість виробництва. Для визначення оптимального режиму обігріву потрібні спеціальні математичні моделі й методи розрахунку [3]. Тому актуальним завданням є створення методів аналізу багатофакторного процесу обігрівання ґрунту для вибору енергоефективного режиму.

Відомо, що в разі використання штучного нагрівання ґрунту для різних сільськогосподарських культур вкрай важливо підтримувати певну температуру на визначеній глибині в ґрунті теплиці. При цьому слід забезпечити такий режим нагріву, щоб мінімізувати витрати енергії на обігрів. Це пов'язано з тим, що наразі існує тенденція до використання зрідженого газу для опалення, який є досить дорогим для підприємств, а особливо для невеликих фермерських господарств.

Вибір режиму нагріву ґрунту в теплиці потребує інформації про формування теплових полів у ґрунті за різних умов. Для аналізу динаміки формування теплових полів у ґрунті використовують метод фізичного моделювання. Цей метод має такі переваги:

- 1) забезпечує наочну інтерпретацію результатів дослідження;
- 2) результати експериментальних досліджень можуть бути використані для тестування теоретичних моделей;
- 3) результати експериментальних досліджень є практично беззаперечними.

Однак фізичний експеримент має також певні недоліки:

- 1) постановка експерименту потребує значного часу;
- 2) висока вартість обладнання, яке використовують для проведення експерименту;
- 3) значні витрати часу на підготовку експерименту, його проведення та обробку даних вимірювань;
- 4) існують фізичні процеси, для яких проведення фізичного експерименту є неможливим або дуже складним.

З теоретичної точки зору задача прогрівання ґрунту в теплиці належить до задач теплопровідності. Для розв'язку задач цього класу використовують такі теоретичні методи (М. М. Беляєв, О. О. Рядно «Методи теорії теплопровідності»):

1. Класичні методи розв'язання рівняння теплопровідності: метод Фур'є, використання функцій Гріна, метод теплових потенціалів.
2. Метод інтегральних перетворень у нескінченних межах, у скінченних межах.
3. Варіаційні методи: метод Рітца, метод Канторовича, метод Треффца, метод Лейбензона, метод Біо.
4. Методи лінеаризації: метод збурень, метод послідовних наближень тощо.
5. Проскційні методи: метод колокацій, метод Бубнова–Галеркіна, інтегральні методи тощо.

1. Методи зведення крайової задачі до рівнянь іншого типу, а саме:

- зведення крайової задачі з нелінійними граничними умовами до еквівалентного нелінійного функціонального рівняння;
- зведення крайової задачі з коефіцієнтами переносу, що залежать від температури, до нелінійного інтегрального рівняння;
- зведення крайової задачі теплопровідності до крайової задачі для звичайного диференціального рівняння з нелінійними граничними умовами.

2. Чисельні методи: метод скінченних різниць, варіаційно-різницеві методи, метод прямих [4].

3. Метод Монте–Карло.

Останнім часом найбільшого поширення набули чисельні методи розв'язання задач теплопровідності, які дозволяють знайти розв'язок крайової задачі практично без суттєвих спрощень фізичної постановки задачі. Ці методи мають такі переваги:

1. Можливість проведення обчислювального експерименту з різним ступенем точності.

2. Можливість використання наявних комерційних програмних пакетів для дослідження динаміки формування температурних полів.

3. Дослідження теплових процесів, для яких неможливе проведення фізичного експерименту.

4. Економія часу на отримання результатів досліджень.

Утім, також варто зазначити недоліки чисельних моделей:

1. Досить висока вартість комерційних програмних пакетів для проведення досліджень процесів тепломасопереносу.

2. Необхідність наявності ліцензії на використання комерційного пакета для чисельного моделювання процесів тепломасопереносу.

3. Використання комерційних пакетів дозволяє вирішувати задачі лише у тій постановці, яка «закладена» в пакет. Налаштування пакета для інших задач є неможливим.

Слід зазначити, що особливість розглянутого процесу – визначення динаміки штучного нагрівання ґрунту та обґрунтування раціональних, енергоощадних режимів нагріву ґрунту в теплицях – потребує проведення значної кількості розрахунків. Тому необхідна розробка швидких методів розрахунку теплового процесу нагрівання ґрунту з метою його наукового обґрунтування.

### Мета

Робота спрямована на розробку одновимірної експрес-моделі для аналізу процесу штучного прогрівання ґрунту в теплиці, створення комп'ютерної програми для її реалізації та проведення обчислювального експерименту з визначення динаміки штучного нагрівання ґрунту в умовах теплиці.

### Методика

Розглядаємо процес нагрівання ґрунту в теплиці за рахунок теплового елемента, розташованого на глибині  $h$  у ґрунті. Поширення тепла в ґрунті здійснюється за рахунок теплопровідності. Моделювальне рівняння цього процесу має вигляд [1, 5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

де  $T$  – температура ґрунту;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $x$  – декартова координата;  $t$  – час.

Крайові умови для моделювального рівняння (1) такі (рис. 6):

1. За  $x = 0$  задана температура  $T_s = 20$  °С, що підтримується постійною (гранична умова першого роду).

2. Наприкінці розрахункової зони реалізується умова «теплоізоляованої» стінки.

У початковий момент часу приймаємо, що в розрахунковій зоні відома температура  $T_0 = 20$  °С.

*Чисельна модель.* Для чисельного інтегрування моделювального рівняння (1) використовуємо схему сумарної апроксимації. Ця схема має вигляд двокрокового розщеплення:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Невідоме значення температури всередині ґрунту на кожному кроці розщеплення визначаємо за явною формулою біжного розрахунку.

Ця чисельна модель була реалізована у вигляді комп'ютерного коду «SOIL-1», мова програмування FORTRAN.

Для проведення розрахунків на базі побудованої чисельної моделі потрібно задати:

1. Глибину ґрунту в теплиці.
2. Зону розташування коріння рослин.
3. Місце розташування в ґрунті нагрівального елемента.
4. Коефіцієнт температуропровідності ґрунту.
5. Температуру нагрівального елемента.
6. Час, коли нагрівальний елемент припиняє «роботу».

7. Початкову температуру ґрунту.
8. Температуру на поверхні ґрунту ( $x = 0$ ).
9. Температуру наприкінці розрахункової зони.

Початкові дані для проведення розрахунків наведені в файлі TE1.dat.

### Результати

На першому етапі було здійснено тестування розробленої чисельної моделі. Для цього розглянуто розв'язок такого рівняння нестационарної теплопровідності [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Крайові умови для вказаного рівняння такі:

1. Ізотермічна умова на межі  $x = 0$ :  $T = T_s$ .
2. На іншій межі:  $T(\infty, t) = T_0$ .
3. Для моменту часу  $t = 0$ :  $T(x, 0) = T_0$ .

Ці крайові умови висвітлюють таку задачу: задана температура на поверхні ґрунту  $T_s$  внаслідок дії деякого джерела емісії тепла. Початкова температура ґрунту дорівнює  $T_0$ . Потрібно визначити, як змінюється температура ґрунту з часом у деякій точці.

Аналітичний розв'язок цієї крайової задачі має вигляд (F. Kreith, W. Black):

$$T(x, t) = T_s + (T_0 - T_s) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right).$$

Ця залежність дозволяє визначити динаміку зміни температури всередині ґрунту для різних моментів часу.

Розв'язок крайової задачі знайдено за таких умов:  $T_0 = 15^\circ\text{C}$  (початкова температура ґрунту);  $a = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $T_s = 100^\circ\text{C}$  (температура на поверхні ґрунту). Ставимо задачу – визначити динаміку зміни температури в точці  $x = 5 \text{ см}$  від поверхні ґрунту ( $x = 0$  – поверхня ґрунту). Під час проведення обчислювального експерименту довжину розрахункової зони взято 1 м, кількість розрахункових точок 500.

Результати розв'язку тестової задачі наведено в табл. 1.

Аналіз даних із табл. 1 вказує на задовільне узгодження чисельних результатів та аналітичного розв'язку.

Таблиця 1

### Значення температури ґрунту на глибині 5 см

Table 1

#### Soil temperature value at a depth of 5 cm

Час	Аналітичний розв'язок	Чисельний розв'язок
2 000 с	37,1 °C	36,8 °C
5 000 с	55,8 °C	55,4 °C
7 200 с	62,2 °C	61,9 °C

На другому етапі було розв'язано модельну задачу з визначення динаміки зміни температури ґрунту в теплиці від нагрівального елемента, розташованого на глибині 48 см. Коренева система знаходиться на глибині 24 см. Розрахункова схема показана на рис. 6. Довжина розрахункової зони 1 м. Розглядаємо сценарій, коли в момент часу  $t = 0$  температура нагрівального елемента дорівнює  $60^\circ\text{C}$ . В момент часу  $t = 1\,000$  од. (час безрозмірний) нагрівальний елемент припиняє роботу. Ставимо задачу визначити динаміку зміни температури в ґрунті.

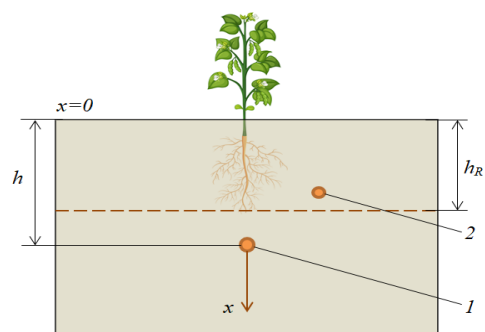


Рис. 6. Схема розрахункової зони:

- 1 – нагрівальний елемент (на глибині  $h$ );  
2 – зона розташування коріння;  $h$  – глибина теплового елемента

Fig. 6. Scheme of the calculation area:

- 1 – heating element (at depth  $h$ ); 2 – root location zone;  
 $h$  – depth of the heating element

На рис. 7 показано, як змінюється температура в ґрунті на ділянці 0 – 42 см, тобто на ділянці від поверхні ґрунту до зони розташування нагрівального елемента. Час на рисунку вказано у безрозмірному вигляді.

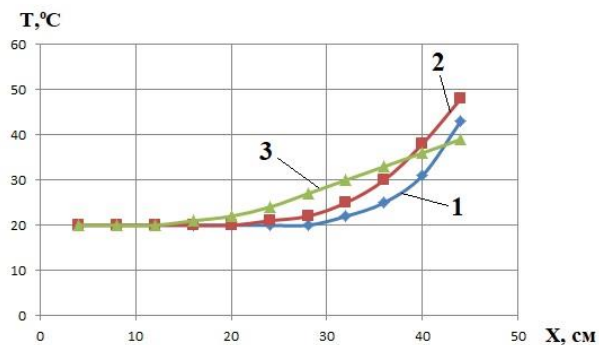


Рис. 7. Зміна температури в ґрунті для різних моментів часу:  
1 –  $t = 500$ ; 2 –  $t = 1\,000$ ; 3 –  $t = 2\,000$

Fig. 7. Change in soil temperature at different times:  
1 –  $t = 500$ ; 2 –  $t = 1\,000$ ; 3 –  $t = 2\,000$

Як бачимо з рис. 7, для обраного режиму нагріву ґрунту, тобто для нагрівання на часовій ділянці  $[0 - 1\,000]$  температура ґрунту збільшується на глибині 24 см – 42 см. Значить, за цей проміжок часу нагрівання буде лише до «кінчиків» коріння. Далі прогрівання ґрунту зупиняється та починається спад температури на ділянці прогріву. Таким чином, за заданого режиму роботи нагрівального елемента ґрунт не встигає прогрітися до зони основного розташування кореневої системи. Отже, потрібно або збільшити час прогрівання ґрунту, або розташувати нагрівальний елемент ближче до кореневої системи. Тому обраний режим роботи нагрівального елемента не є раціональним.

Відзначимо, що час розрахунку на базі розробленої моделі складає 1 с.

### Наукова новизна та практична значимість

Розроблено одновимірну чисельну модель для аналізу штучного прогрівання ґрунту в теплиці. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння теплопровідності. Розроблена модель дозволяє швидко визначити динаміку формування теплових полів у ґрунті як у разі роботи нагрівального елемента, так і в разі його вимикання.

Розроблена чисельна модель може бути корисна на етапі проектування систем для штучного нагрівання ґрунту. Модель дає можливість науково обґрунтувати параметри нагрівальних систем та енергоощадного режиму їх роботи.

Для практичного використання побудованої чисельної моделі потрібна стандартна вхідна інформація. У зв'язку з тим, що час розрахунку на базі розробленої чисельної моделі дорівнює 1 с, можна протягом робочого дня здійснити значну кількість варіантів розрахунків та обґрунтувати обраний режим штучного нагрівання ґрунту.

### Висновки

1. Розглянуто способи прогрівання ґрунту в теплицях.
2. Виконано аналіз наявних методів розв'язку задач теплопровідності.
3. Розроблено одновимірну чисельну модель для розрахунку динаміки штучного нагрівання ґрунту.
4. Розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє швидко обґрунтувати режим штучного нагрівання ґрунту в теплиці.

### 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. Біляєва В., Щербина С. А. Математичне моделювання температурних полів у культивацийних спорудах. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4 (108). С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/316334>
3. Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Прокопенко Т. О. Математичне і комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці для створення системи управління. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24 (2). С. 174–180.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
5. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *Proceedings of 26<sup>th</sup> International Scientific Conference. Transport Means 2022*. 2022. P. 122–127.

6. Dimitropoulou A.-M. N., Maroulis V. Z., Giannini E. N. A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 19. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788>
7. Faniyi B., Luo Z. A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 6. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708>
8. Katzin D., Marcelis L. F. M., van Henten E. J., van Mourik S. Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 230. P. 242–276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003>
9. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy*. 2022. Vol. 325. P. 1–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119815>
10. Wang J., Lee W. F., Ling P. P. Ling Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 2. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653>

V. V. BILIAIEVA<sup>1\*</sup>, S. A. SHCHERBYNA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMetI, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 101 19 78, e-mail [vikabelyaeva604@gmail.com](mailto:vikabelyaeva604@gmail.com), ORCID 0000-0003-2399-3124

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

## Express Model for Analyzing the Process of Soil Heating in a Greenhouse

**Purpose.** The organization of artificial soil heating in a greenhouse plays an important role in ensuring efficient plant cultivation, as the optimal soil temperature is a key factor in this process. The heating itself must be carried out in such a way as to ensure a certain temperature range in the soil, in particular in the area where the root system of plants is located. The soil heating process depends on the specific operating conditions of the greenhouse. To organize a rational and energy-saving process, it is necessary to determine the parameters of the heating system in advance, at the design stage. An effective method for solving this problem is to use mathematical models. The main purpose of the study is to develop a one-dimensional express model for evaluating the process of soil heating in a greenhouse. **Methodology.** The equation of thermal conductivity was used to study the dynamics of artificial soil heating. The numerical integration of the modeling equation was carried out using a finite-difference scheme of total approximation. **Findings.** A computer program has been developed that can be used to conduct a computational experiment to determine the dynamics of artificial soil heating in a greenhouse. The results of numerical modeling are presented. **Originality.** A one-dimensional numerical model for analyzing artificial soil heating in a greenhouse has been developed. The model is based on the numerical integration of the heat conduction equation and allows us to quickly determine the dynamics of the formation of thermal fields in the soil both in the case of the heating element operation and in the case of its shutdown. **Practical value.** The developed numerical model can be a useful tool at the design stage of artificial soil heating systems. It provides scientific justification for the parameters of heating systems and energy-efficient modes of their operation. The model allows you to quickly assess the dynamics of thermal fields in the soil both during the operation of the heating element and after it is turned off. For practical application of the numerical model, only standard input information is required. Controlling the dynamics of soil heating opens up opportunities for optimal control of the heating system operation modes.

*Key words:* energy saving; thermal conductivity; soil heating; greenhouse; mathematical 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. Biliaieva, V. V., & Shcherbyna, S. A. (2024). Mathematical Modeling of Temperature Fields in Cultivation Structures. *Science and Transport Progress*, 4(108), 13-20. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/316334> (in Ukrainian)
3. Vikhrova, L., Kalich, V., & Prokopenko, T. (2011). A mathematical and computer design of distributing of temperatures in a hothouse. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 24(2), 174-180. (in Ukrainian)

4. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Biliaiev, M., Rusakova, T., Biliaieva, V., Kozachyna, V., & Berlov, O., Semenenko P. (2022). Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *Proceedings of 26<sup>th</sup> International Scientific Conference. Transport Means 2022*, 122-127. (in English)
6. Dimitropoulou, A.-M. N., Maroulis, V. Z., & Giannini, E. N. (2023). A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*, 16(19), 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788> (in English)
7. Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*, 16(6), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708> (in English)
8. Katzin, D., Marcelis, L. F. M., van Henten, E. J., & van Mourik, S. (2023). Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering*, 230, 242-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003> (in English)
9. Sun, W., Wei, X., Zhou, B., Lu, C., & Guo, W. (2022). Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy*, 325, 1-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119815> (in English)
10. Wang, J., Lee, W. F., & Ling, P. P. (2020). Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences*, 10(2), 653. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.11.2024

Прийнята до друку: 11.03.2025

**УДК 629.783:519.87****В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>, М. М. БІЛЯЄВ<sup>2</sup>, В. В. БІЛЯЄВА<sup>3</sup>, П. В. СЕМЕНЕНКО<sup>4</sup>,  
З. М. ЯКУБОВСЬКА<sup>5</sup>**

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

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

<sup>3</sup>Каф. «Природничо-наукових та загально інженерних дисциплін», ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, Запоріжжя, Україна, 69008, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4</sup>ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна, 49008, тел. +38 (056) 372 00 22, ел. пошта semenenko1981@gmail.com, ORCID ID 0000-0003-0447-5591

<sup>5</sup>Каф. енергетики, Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, пр. Науки, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

**Математичне моделювання теплового режиму в обтічнику ракети-носія на етапі передстартової підготовки**

**Мета.** Розвиток систем супутникового зв'язку базується на транспортуванні супутників у космосі. Транспортування супутника на орбіту здійснюють за допомогою ракети-носія. Супутник розміщується в транспортному відсіку в середині головного обтічника. На етапі передстартової підготовки необхідно дотримуватися жорстких умов середовища в середині головного обтічника. Зокрема, дуже важливо спрогнозувати температурне поле в транспортному відсіку в середині головного обтічника під час його примусової вентиляції на етапі передстартової підготовки. Для рішення цієї задачі потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. Головною метою роботи є розробка швидкорозрахункової моделі для оцінювання температурних полів у середині обтічника ракети-носія. **Методика.** Для розрахунку температурного поля, що формується вентиляцією транспортного відсіку та виділенням тепла від різних елементів супутника, було використано рівняння енергії. Це рівняння враховувало інтенсивність тепловиділення з різних частин супутника, картину обтікання супутника повітряним потоком, теплообмін у транспортному відсіку. Неоднорідне поле швидкості повітряного потоку в транспортному відсіку розраховано на основі моделі потенційної течії. Для чисельного інтегрування рівнянь моделі використано скінченно-різницеві схеми. **Результати.** Розроблено комп'ютерний код, який реалізує запропоновану чисельну модель. Наведено результати обчислювальних експериментів з оцінки температурного режиму в головному обтічнику ракети-носія для різних супутників. **Наукова новизна.** Створено швидкорозрахункову CFD-модель для аналізу теплових полів у середині обтічника ракети-носія на етапі передстартової підготовки. Модель дає можливість визначати в середині обтічника зони з підвищеною температурою. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути корисна для вибору та обґрунтування режиму вентиляції головного обтічника ракети-носія на етапі передстартової підготовки з метою забезпечення рекомендованого діапазону температури біля супутника. Також може бути використана для первинної оцінки температури в головному обтічнику на етапі обґрунтування режиму терморегулювання для конкретного супутника або супутникової системи.

*Ключові слова:* головний обтічник; температурне поле; теплоперенос; математичне моделювання

**Вступ**

Сьогодні супутники відіграють значну роль у підвищенні рівня життя людей. Супутникові системи визначають розвиток усіх галузей науки, техніки, промисловості, сільського господарства, банківського сектору, транспорту та екології. Ракета-носій – це бортова система, яка доставляє корисне навантаження з Землі в суборбіта-

льний, орбітальний або міжпланетний простір. Корисне навантаження зазвичай розміщується в космічному апараті (КА) або супутнику, який знаходиться в транспортному відсіку ракети-носія в головному обтічнику (рис. 1–3).

На етапі передстартової підготовки важливим кроком є прогнозування температурного поля, яке формується під впливом примусової вентиляції головного обтічника (транспортного

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

відсіку) за одночасного виділення тепла від різних технологічних елементів у середині супутника. Вимірювання теплового потоку від супутника є складним завданням, оскільки майже кожен елемент у середині супутника генерує тепло за рахунок своєї роботи. Крім цього, власник супутника не дає дозволу на встановлення вимірювальної апаратури в головний обтічник після розташування супутника.



Рис. 1. Головний обтічник ракети-носія «CYCLONE»

[<https://space.com.ua/2020/08/21/kb-pivdenne-pratsyuye-nad-unifikatsiyeyu-tretogo-stupenya-ri-tsiklon-4/>]

Fig. 1. Main fairing of the launch vehicle «CYCLONE»

[<https://space.com.ua/2020/08/21/kb-pivdenne-pratsyuye-nad-unifikatsiyeyu-tretogo-stupenya-ri-tsiklon-4/>]



Рис. 2. Розташування супутника (корисне навантаження) у середині головного обтічника

[<https://www.elonx.net/fairing-recovery-compendium/>]

Fig. 2. Satellite (payload) location inside the main fairing [<https://www.elonx.net/fairing-recovery-compendium/>]



Рис. 3. Вихід супутника на орбіту  
[<https://spaceflightnow.com/2021/11/07/ariane-5-rocket-fairing-cleared-for-webb-launch-after-perfect-performance-on-last-flight/>]

Fig. 3. Satellite exit from orbit  
[<https://spaceflightnow.com/2021/11/07/ariane-5-rocket-fairing-cleared-for-webb-launch-after-perfect-performance-on-last-flight/>]

Значне підвищення температури в середині головного обтічника може призвести до перегріву внутрішніх елементів супутника, що знижує ризик його безаварійного виведення на орбіту. Дослідження процесів терморегулювання головного обтічника залишається актуальним завданням. Його вирішення дозволить визначити раціональне розташування отворів для поліпшення вентиляції біля супутника.

Результати експериментальних досліджень поля розподілу температури в різних блоках головного обтічника у випадку регулювання температури наведено в роботах [6, 7]. Аналіз характеристик внутрішньої течії в головному обтічнику проведено за допомогою CFD-моделювання на основі рівнянь Нав'є–Стокса та моделі турбулентності [8]. На основі розв'язання диференціальних рівнянь газодинаміки чисельними методами було проведено аналіз вентиляції та розташування КА в головному обтічнику під час польоту [9]. Однак за допомогою цього моделювання не було отримано поля швидкостей і температури в головному обтічнику. Дослідження особливостей зміни тиску в головному обтічнику в умовах польоту проведено в [3]. У роботі [4] показано вплив розташування дренажних отворів на дослідження характеристик течії газу у відсіку під головним обтічником. Розрахунки температурного поля та поля швидкостей у потоці повз блок, де розташовані бортові прилади, прове-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

дено на основі CFD-моделей програмного пакета Ansys Fluent [14], що потребує значних затрат комп'ютерного часу. Аналіз літературних джерел показав, що сьогодні існує певний дефіцит швидкорозрахункових чисельних моделей для прогнозування температурних полів в головному обтічнику [1, 5, 10–13, 15].

**Мета**

Робота спрямована на розробку чисельної моделі, що дозволяє в режимі реального часу прогнозувати теплові поля в середині головного обтічника зі супутником.

**Методика**

Для математичного моделювання процесу формування температурного поля повітря в головному обтічнику використовуємо рівняння енергії:

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

де  $T$  – температура повітря в середині обтічника;  $a_x, a_y$  – коефіцієнти теплопровідності;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;  $(x_i, y_i)$  – координати джерела емісії тепла;  $t$  – час.

Для розв'язання рівняння (1) задано граничні умови:

1) на межі входу повітряного потоку в головний обтічник  $T|_{AB} = T_{entrance}$ , де  $T_{entrance}$  – відома температура повітряного потоку, який потрапляє через вентиляцію в переріз АВ, тобто температура повітряного потоку на вході в розрахункову зону;

2) на межі виходу повітряного потоку з обтічника:  $\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{CD} = 0$ , де  $\vec{n} = (x_i, y_i)$  – одиничний

вектор зовнішньої нормалі на межі виходу повітряного потоку з отворів у головному обтічнику;

3) якщо частина поверхні супутника виділяє тепло, то гранична умова має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{surface} = q, \text{ де } q \text{ – відоме значення тепло-$$

вого потоку від деякої ділянки поверхні супутника, що нагрівається;

4) якщо на частині поверхні супутника не відбувається виділення тепла, то гранична умова має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{surface} = 0;$$

$$5) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{surface} = 0 \text{ – на стінках головного обті-}$$

чника.

Для моменту часу початкову умову запишемо таким чином:  $T_{t=0} = T_0$ , де  $T_0$  – відома температура повітряного потоку в середині головного обтічника.

Для розрахунку температурного поля на основі рівняння (1) необхідно знати розподіл компонентів поля швидкості повітряного потоку в середині головного обтічника. Для моделювання руху повітряного потоку використовуємо рівняння потенційного потоку (2):

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

де  $P$  – потенціал швидкості повітряного потоку.

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

$$1) \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{AB} = U \text{ – умова Неймана на межі, де}$$

потік входить у головний обтічник зі швидкістю  $U$ . У разі виконання обчислювальних експериментів на межі входу повітряного потоку задають рівномірний потік повітря:  $U = \text{const}$ ;

2) на межі виходу повітряного потоку з обтічника:  $P = P_0 + \text{const}$  – умова Діріхле, де  $P_0$  – довільна константа;

$$3) \text{ на поверхні супутника, на стінках головного обтічника: } \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{surface} = 0, \text{ де } \vec{n} \text{ – одинич-}$$

ний вектор зовнішньої нормалі до твердого тіла.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку пов'язані з потенціалом швидкості повітряного потоку на основі залежностей:

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

Для визначення потенційного поля швидкості повітряного потоку необхідно розв'язати рівняння (2). Отримані значення потенціалу швидкості дозволяють розрахувати компоненти вектора швидкості повітряного потоку на основі залежностей (3). Знайдені компоненти швидкості повітряного потоку використовуємо для визначення температурного поля повітря (потоку в разі розв'язання рівняння (1)).

Розглянемо методику побудови чисельної моделі на основі рівнянь (1)–(3). Чисельне інтегрування рівнянь моделі проведено на прямокутній різницевій сітці [2]. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використано метод Лібмана. У цьому випадку різницева рівняння має вигляд:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (4)$$

Значення потенціалу швидкості в центрах різницевої комірки визначаємо так:

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

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

Розрахунок за цією залежністю закінчується, коли:

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

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:

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

Для чисельного інтегрування рівняння (1) розбиваємо його на два рівняння (4)–(5):

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

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

Далі виконуємо такі перетворення та апроксимації похідних:

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

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

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

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

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

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

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

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

З урахуванням цих перетворень схема розщеплення для рівняння (4) має вигляд:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Значення температури визначається на кожному обчислювальному кроці розв'язку.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для чисельного інтегрування рівняння (7) використовуємо таку різницеву схему розщеплення:

– на першому кроці:

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j}^{n+1/2} - T_{i,j}^n}{0,5\Delta t} = & a_x \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x^2} + \\ & + a_x \frac{-T_{i,j}^{n+1/2} + T_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + a_y \frac{T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \\ & + a_y \frac{-T_{i,j}^{n+1/2} + T_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}; \end{aligned}$$

– на другому кроці:

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta t} = & a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \\ & + a_x \frac{-T_{i,j}^{n+1/2} + T_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \\ & + a_y \frac{-T_{i,j}^{n+1/2} + T_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}. \end{aligned}$$

Тобто визначення температури повітря в обтічнику здійснюють за декілька кроків.

Для проведення обчислювальних експериментів здійснено програмну реалізацію побудованої чисельної моделі мовою FORTRAN. Розроблено пакет програм «SATELITE–2A».

### Результати

Далі наведено результати розв'язання моделі задачі на основі розробленого методу чисельного розрахунку температурного поля в головному обтічнику. Розрахунок здійснено для ракети-носія «CYCLONE–4». Обчислювальні експерименти проведено для трьох сценаріїв:

1) сценарій № 1: в обтічнику розташований супутник, але відсутні додаткові елементи (рис.4);

2) сценарій № 2: в обтічнику розташований додатковий елемент до зони тепловиділення (рис.5);

3) сценарій № 3: в обтічнику розташований додатковий елемент над зоною тепловиділення (рис.6).

Розрахункова зона мала розміри: довжина 4,99 м, ширина 4 м. Швидкість повітряного потоку, наданого для провітрювання, становила 1,9 м/с, температура 21 °С. Прийнято, що на ділянці (лівий бік супутника) має місце тепловий потік  $q = 300$  Вт. Розглянуто такі сценарії:

1) усередині головного обтічника відсутні додаткові елементи, крім супутника,;

2) усередині головного обтічника є додатковий елемент, що розташований до зони виділення тепла;

3) усередині головного обтічника є додатковий елемент, що розташований над зоною виділення тепла.

Результати розв'язання задачі показано нижче на рисунках. На рис. 7–9 показано значення температури у відсотках від максимальної температури  $T_{\max}$ .

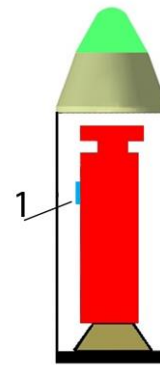


Рис. 4. Розрахункова схема, сценарій № 1:  
1 – зона тепловиділення

Fig. 4. Calculation scheme, scenario № 1:  
1 – heat emission zone

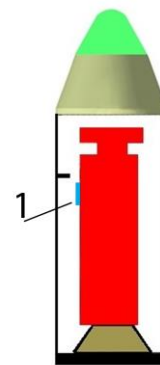


Рис. 5. Розрахункова схема, сценарій № 2:  
1 – зона тепловиділення

Fig. 5. Calculation scheme, scenario № 2:  
1 – heat emission zone

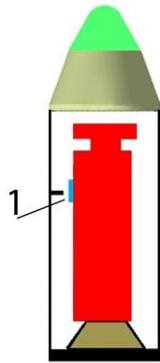


Рис. 6. Розрахункова схема, сценарій № 3:  
1 – зона тепловиділення

Fig. 6. Calculation scheme, scenario № 3:  
1 – heat emission zone

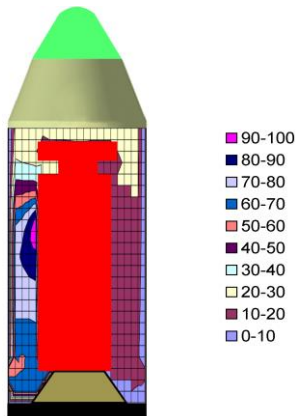


Рис. 7. Поле температури в середині обтічника,  
сценарій № 1,  $T_{\max} = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 7. Temperature field inside the fairing,  
scenario № 1,  $T_{\max} = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

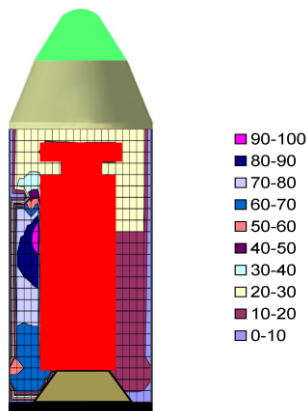


Рис. 8. Поле температури в середині обтічника,  
сценарій № 2,  $T_{\max} = 79 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 8. Temperature field inside the fairing,  
scenario № 2,  $T_{\max} = 79 \text{ }^{\circ}\text{C}$

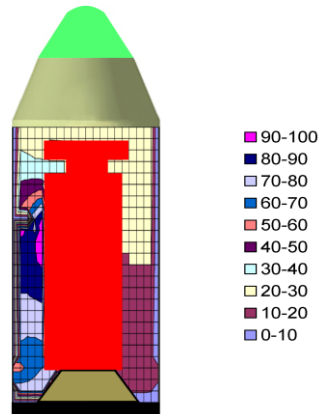


Рис. 9. Поле температури в середині обтічника,  
сценарій № 3,  $T_{\max} = 80,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 9. Temperature field inside the fairing,  
scenario № 3,  $T_{\max} = 80,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналіз даних, наведено на рисунках, показує, що наявність зони, де має місце виділення тепла, створює нерівномірну зону розподілу температури біля лівої стінки супутника. Поле температури біля правої стінки супутника характеризується плавною зміною температури. Можна побачити, що на формування поля температури в середині обтічника впливає наявність додаткового елемента (пластини). Біля зони виділення тепла формується підзона зі значним градієнтом температури.

На рис. 10 показано розподіл температури біля поверхні супутника в зоні виділення тепла. Тут координата  $x=0$  відповідає початку «тіла» супутника.

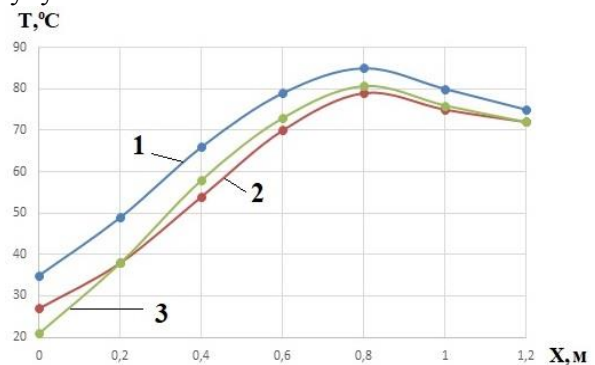


Рис. 10. Розподіл температури біля поверхні супутника:

1 – сценарій № 1; 2 – сценарій № 2;  
3 – сценарій № 3

Fig. 10. Temperature distribution near the satellite's surface:

1 – scenario № 1; 2 – scenario № 2;  
3 – scenario № 3

Як можна бачити з рис. 10, використання додаткової пластини дає можливість зменшити температуру повітря біля поверхні супутника. Ефективність зниження температури біля поверхні супутника для різних позицій розташування додаткового елемента – різна. Із точки зору зменшення максимальної температури більш ефективним є сценарій № 2. Також можна бачити, що використання додаткового елемента (сценарій № 3) дає можливість на ділянці 0–0,2 м зменшити температуру практично на 10 °С.

Відзначимо, що час розрахунку становив 5 с.

### Наукова новизна та практична значимість

У статті розглянуто швидкорозрахункову CFD модель для аналізу теплових полів всередині обтічника ракети-носія на етапі передстартової підготовки. Модель дає можливість визначати всередині обтічника зони з підвищеною температурою.

Розроблена чисельна модель може бути корисна для вибору та обґрунтування режиму вентиляції головного обтічника ракети-носія на етапі передстартової підготовки з метою забезпечення рекомендованого діапазону темпера-

тури біля супутника. Модель дає можливість оцінювати вплив конструктивних рішень щодо зміни температурного режиму всередині обтічника для зменшення тепловиділення з поверхні супутника.

### Висновки

У статті запропонована CFD-модель для аналізу теплових полів усередині обтічника ракети-носія в разі примусової вентиляції обтічника на етапі передстартової підготовки. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння аеродинаміки та рівняння енергії.

Побудована модель дозволяє враховувати складну геометричну форму супутника, розташування вентиляційних отворів, зони тепловиділення на поверхні супутника, режим вентиляції обтічника. Особливістю моделі є малі витрати комп'ютерного часу під час проведення обчислювального експерименту.

Розроблена програма «SATELITE–2A» дає можливість проводити комп'ютерні розрахунки за короткий час, приблизно 5 с.

Розроблений метод може бути використаний для первинної оцінки температури в головному обтічнику на етапі обґрунтування режиму терморегулювання для конкретного супутника або супутникової системи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Булавка С. С. Результаты экспериментальных исследований усовершенствованной системы термостатирования воздуха ракет-носителей. *Наукові нотатки*. 2021. № 71. С. 9–15.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., ВХрущ. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Кашанов А. Э., Дегтярев А. В., Гладкий Э. Г., Баранов Е. Ю. Оценка технических рисков при пуске ракеты-носителя «Днепр». *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 5 (92). С. 113–117.
4. *Ariane 5. User's Manual Issue 5 Revision 2*. 2016. URL: [https://courses.edx.org/asset-v1:DelftX+AEASM1x+1T2022+type@asset+block/Ariane5\\_Users-Manual\\_October2016\\_Red.pdf](https://courses.edx.org/asset-v1:DelftX+AEASM1x+1T2022+type@asset+block/Ariane5_Users-Manual_October2016_Red.pdf)
5. Baggerman C., McCabe M., Verma D. Avionics System Architecture for the NASA Orion Vehicle. *SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series*. 2009. DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-3276>
6. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., ..., Tatarko L. Development of a method for assessing air dustiness in the main fairing of the launch vehicle. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2022. Vol. 5, No. 1 (119). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013>
7. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *26th International Scientific Conference Transport Means 2022* (Kaunas, 05–07 Oct. 2022). Kaunas, 2022. Pt. I. P 122–127.
8. Compartment venting – Space vehicle design criteria. *NTRS - NASA Technical Reports Server*. 1970. 31 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690>

9. Falcon User's Guide. *Space Exploration Technologies Corp.* 2021. URL: <https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf>
10. Hao P., Li Z., Feng S., Li W., Wang Y., Wang B. A novel framework for reliability assessment of payload fairing separation considering multi-source uncertainties and multiple failure modes. *Thin-Walled Structures*. 2021. Vol. 160. P. 107327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107327>
11. Li Y., Zong Z., Sun T. Classification of the collapse of a composite fairing during the oblique high-speed water entry. *Thin-Walled Structures*. 2023. Vol. 182. P. 110260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110260>
12. Mathew L. M., Deepak B. P., & Sabu, B. Design and Analysis of a Metallic Ogive Payload Fairing for a New Generation Launch Vehicle. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2016. Vol. 13. Iss. 05. P. 99–103. DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-13050199103>
13. Mishra N. K., Harshitha G., Reddy G. V., Anirudh P., Aashritha, V., Govind K. Computational study on rocket payload fairing, *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.244>
14. Nallasamy R., Kandula M., Duncil L., Schallhorn P. Three-Dimensional Flowfield in the Scaled Payload Fairing Model of an Expendable Launch Vehicle. *38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit (Seattle, 23–26 June 2008)*. Seattle, 2008. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2008-4302>
15. Vanhove E., Tondou T., Roussel J. F., Faye D., Guigue P. In Situ Real-Time Quantitative and Qualitative Monitoring of Molecular Contamination. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2016. Vol. 53, No. 6. P. 1166–1171. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.A33505>

V. A. KOZACHYNA<sup>1\*</sup>, M. M. BILIAIEV<sup>2</sup>, V. V. BILIAIEVA<sup>3</sup>, P. V. SEMENENKO<sup>4</sup>,  
Z. M. YAKUBOVSKA<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

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

<sup>3</sup>Dep. «Natural Sciences and General Engineering Disciplines», LLC «Technical University «METINVEST POLYTECHNIC»», 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, Ukraine, 69008, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4</sup>Yuzhnoye State Design Office, Krivorozhskaya St., 3, Dnipro, Ukraine, 49008, tel. +38 (056) 372 00 22, e-mail semenenkopv1981@gmail.com, ORCID ID 0000-0003-0447-5591

<sup>5</sup>Dep. of Power Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI USUCT, Science Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

## Mathematical Modeling of Thermal Regime in the Launch Vehicle Fairing at the Stage of Prelaunch Preparation

**Purpose.** The development of satellite communication systems is based on the transportation of satellites in space. The satellite is transported into orbit by a launch vehicle. The satellite is placed in the transportation compartment in the middle of the main fairing. At the pre-launch stage, it is necessary to comply with the harsh environmental conditions inside the main fairing. In particular, it is very important to predict the temperature field in the transport compartment inside the main fairing during its forced ventilation at the pre-launch stage. To solve this problem, it is necessary to have specialized mathematical models. The main goal of this work is to develop a fast-calculating model for estimating the temperature fields inside the launch vehicle fairing. **Methodology.** The energy equation was used to calculate the temperature field formed by the ventilation of the transport compartment and the heat generated by various elements of the satellite. This equation took into account the intensity of heat emission from different parts of the satellite, the pattern of airflow around the satellite, and heat transfer in the transportation compartment. The inhomogeneous airflow velocity field in the cargo compartment was calculated based on a potential flow model. Finite-difference schemes are used for numerical integration of the model equations. **Findings.** A computer code has been developed that implements the proposed numerical model. The results of computational experiments to assess the temperature regime in the main fairing of the launch vehicle for different satellites are presented. **Originality.** A fast-calculating CFD model for analyzing thermal fields in the middle of the launch vehicle fairing at the stage of prelaunch preparation has been created. The model makes it possible to deter-

mine the zones with sub- and over-temperature in the middle of the fairing. **Practical value.** The developed numerical model can be useful for selecting and justifying the ventilation mode of the main fairing of the launch vehicle at the pre-launch stage in order to ensure the recommended temperature range near the satellite. It can also be used for the initial assessment of the temperature in the main fairing at the stage of justifying the thermal control mode for a particular satellite or satellite system.

*Key words:* main fairing; temperature field; heat transfer; mathematical modeling

## REFERENCES

1. Bulavka, S. S. (2021). Experimental results of an advanced thermostat system the air of launch vehicles. *Naukovi notatki*, 71, 9-15. (in Russian)
2. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
3. Kashanov, O. E., Degtyarev, O. V., Gladkiy, E. G., & Baranov, E. Y. (2012). The assessment of technical risks during dnepr Iv launch. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 5(92), 113-117. (in Russian)
4. *Ariane 5. User's Manual Issue 5 Revision 2*. (2016). Retrieved from [https://courses.edx.org/asset-v1:DelftX+AEASM1x+1T2022+type@asset+block/Ariane5\\_Users-Manual\\_October2016\\_Red.pdf](https://courses.edx.org/asset-v1:DelftX+AEASM1x+1T2022+type@asset+block/Ariane5_Users-Manual_October2016_Red.pdf) (in English)
5. Baggerman, C., McCabe, M., & Verma, D. (2009). Avionics System Architecture for the NASA Orion Vehicle. *SAE Technical Paper Series*. DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-3276> (in English)
6. Biliaiev, M., Biliaieva, V., Rusakova, T., Kozachyna, V., Berlov, O., Semenenko, P., ..., & Tatarko, L. (2022). Development of a method for assessing air dustiness in the main fairing of the launch vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(119)), 17-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013> (in English)
7. Biliaiev, M., Rusakova, T., Biliaieva, V., Kozachyna, V., Berlov, O., & Semenenko, P. (2022, Oct.). Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. In *26th International Scientific Conference Transport Means 2022 (Pt. I)*, pp. 122-127. Kaunas, Lithuania. (in English)
8. Compartment venting - Space vehicle design criteria. (1970). *NTRS - NASA Technical Reports Server*. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690> (in English)
9. Falcon User's Guide. (2021). *Space Exploration Technologies Corp*. Retrieved from <https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf> (in English)
10. Hao, P., Li, Z., Feng, S., Li, W., Wang, Y., & Wang, B. (2021). A novel framework for reliability assessment of payload fairing separation considering multi-source uncertainties and multiple failure modes. *Thin-Walled Structures*, 160, 107327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107327> (in English)
11. Li, Y., Zong, Z., & Sun, T. (2023). Classification of the collapse of a composite fairing during the oblique high-speed water entry. *Thin-Walled Structures*, 182, 110260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110260> (in English)
12. Mathew, L. M., Deepak, B. P., & Sabu, B. (2016). Design and Analysis of a Metallic Ogive Payload Fairing for a New Generation Launch Vehicle. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(05), 99-103. DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-13050199103> (in English)
13. Mishra, N. K., Harshitha, G., Reddy, G. V., Anirudh, P., Aashritha, V., & Govind, K. (2023). Computational study on rocket payload fairing. *Materials Today: Proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.244> (in English)
14. Nallasamy, R., Kandula, M., Duncil, L., & Schallhorn, P. (2008, June). Three-Dimensional Flowfield in the Scaled Payload. Fairing Model of an Expendable Launch Vehicle. In *38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit* (pp. 1-21). Seattle, Washington. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2008-4302> (in English)
15. Vanhove, E., Tondou, T., Roussel, J. F., Faye, D., & Guigue, P. (2016). In Situ Real-Time Quantitative and Qualitative Monitoring of Molecular Contamination. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 53(6), 1166-1171. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.a33505> (in English)

Надійшла до редколегії: 15.11.2024

Прийнята до друку: 17.03.2025

## УДК 519.6:[504.5:629.33]

В. М. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, В. В. БІЛЯЄВА<sup>2</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>3\*</sup>, О. В. ЗВОНАРЬОВА<sup>4</sup>,  
П. Б. МАШИХІНА<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

<sup>2</sup>Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>3\*</sup>Каф. охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup>Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

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

## Математичне моделювання забруднення повітря біля автодоріг та оцінювання ризику захворювань у людей, які перебувають у зоні впливу викидів від автомобілів

**Мета.** Робота спрямована на розробку чисельної 2D-моделі, яка дозволяє швидко розрахувати всмоктування забрудненого повітря біля дороги. Швидка розрахункова модель CFD, має враховувати метеорологічні параметри, всмоктувальну трубу біля дороги для видалення забрудненого повітря, швидкість викиду токсичних газів. **Методика.** Розроблена модель базується на рівнянні потенційного потоку та рівнянні масопереносу забруднювача. Рівняння потенційного потоку використовують для обчислення вітрового потоку біля дороги у разі застосування всмоктувальної труби. Для розв'язання рівняння потенційної течії використано метод чисельного інтегрування Лібмана. Для розв'язання рівняння конвективно-дифузійної дисперсії використано неявну змінно-трикутну різницеву схему. Чисельне інтегрування здійснено за допомогою прямокутної різницевої сітки. Для створення форми комплексної розрахункової зони використано метод пористості («метод маркерів»). Викиди токсичних газів від автомобіля змодельовано за допомогою дельта-функції Дірака для точкового джерела. **Результати.** Розроблена чисельна 2D-модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання забруднювальних речовин біля дороги. Модель враховує вплив автомобіля та всмоктувальної труби, розташованої біля дороги для видалення забрудненого повітря. На основі розроблених чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент для оцінки впливу застосування всмоктувальної труби на локальне забруднення атмосферного повітря біля дороги. **Наукова новизна.** Розроблена чисельна модель дозволяє розрахувати двовимірну схему потоку біля дороги, де використано такий захід пом'якшення, як всмоктувальна труба. Модель дозволяє виконувати швидкі розрахунки забруднення повітря з урахуванням впливу захисного бар'єру. На базі даних про розподіл концентрації небезпечної речовини визначено ризик появи захворювань у людини, яка перебуває в зоні впливу викидів від автотранспорту. **Практична значимість.** Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі, проведено обчислювальний експеримент, що проілюстрував ефективність використання моделі для вирішення прикладних задач. Наведено результати чисельного експерименту.

*Ключові слова:* забруднення повітря; міська вулиця; дисперсія забруднення; чисельне моделювання; всмоктувальна труба

### Вступ

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

Наприклад, у [5, 6] це рослинність, пористий асфальт, міцні стіни, пилопоглиначі, ТІО<sub>2</sub> покриття дороги тощо. Кожен метод має свої переваги та недоліки, які можна виявити в конкретних умовах для конкретної дороги. Для вибору заходів пом'якшення необхідно мати науково

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

обґрунтовану інформацію. Застосування конкретного методу пом'якшення також залежить від його вартості, часу встановлення та деяких місцевих умов. Одним із методів видалення забрудненого повітря від дорожнього руху є застосування всмоктувальної труби, з'єднаної з системою, яка забезпечує передачу забрудненого повітря з дороги та його очищення [5, 6]. Для практичного застосування цього методу необхідно вивчити його ефективність для конкретної ділянки дороги з урахуванням її ширини, інтенсивності дорожнього руху, швидкості всмоктування, розмірів всмоктувального отвору тощо.

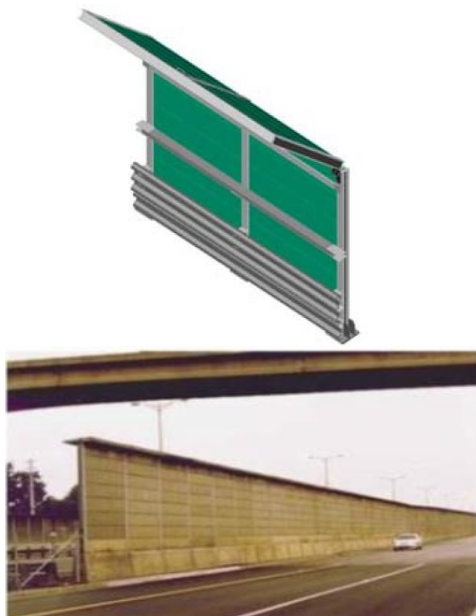


Рис. 1. Зображення бар'єрів, які застосовують для зниження забруднення біля автодоріг

Fig. 1. Image of barriers used to reduce pollution near highways

Щоб отримати цю інформацію на основі фізичних експериментів [13], необхідно провести багато досліджень у лабораторії, тому отримання результатів буде довготривалим. Фізичне моделювання, таким чином, дуже дороге. Більш прийнятним способом є застосування комп'ютерного моделювання. Як правило, багато моделей CFD використовують для вирішення проблем забруднення повітря від дорожнього руху. Для чисельного моделювання часто використовують рівняння Нав'є–Стокса в поєднанні з різними турбулентними моделями. Ці моделі представлені в деяких потужних

комерційних кодах (ANSYS тощо) [7–12]. Але застосування рівнянь Нав'є–Стокса потребує часу [4], і один чисельний експеримент може тривати багато годин. Це незручно, коли потрібно проводити багато чисельних експериментів, враховуючи різні сценарії забруднення повітря від транспорту та вживаючи різні заходи пом'якшення.

У цьому випадку буде зручніше провести чисельні експерименти на основі математичної моделі, що не займає багато часу, потім вибрати відповідні параметри системи пом'якшення для конкретних умов і після цього провести чисельний експеримент на основі рівнянь Нав'є–Стокса для уточнення цих параметрів.

### Мета

Основною метою цієї роботи є розробка чисельної моделі для швидкого обчислення локальної якості повітря біля доріг із застосуванням всмоктувальної трубки для видалення забрудненого повітря з дороги.

### Методика

Для моделювання вітрового потоку біля дороги з урахуванням різних перешкод (транспортний засіб, бар'єр) використовують модель потенціального потоку. У цьому випадку моделювальне рівняння має вигляд:

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

де  $P$  – потенціал швидкості.

Компоненти швидкості вітру розраховують таким чином:

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

Граничні умови для рівняння (1) подано в [4]. Для чисельного інтегрування цього рівняння використано прямокутну сітку.

Розв'язують рівняння (1) за методом розщеплення. У цьому випадку його було записано в «еволюційному» вигляді:

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

де  $t$  – фіктивний час.

На наступному кроці здійснюють геометричне розщеплення цього рівняння таким чином:

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

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

Далі для визначення невідомого значення  $P$  на базі рівняння (3) використовують таку залежність:

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

Для визначення невідомого значення  $P$  на базі рівняння (4) застосовують залежність:

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

Розрахунок закінчують, коли виконано умову:

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

де  $\varepsilon$  – мале число;  $n$  – номер ітерації.

Щоб розв'язати рівняння потенційного потоку, потрібно встановити «початкове» поле  $P$  для початку процедури ітерації. Розрахунок закінчують, якщо виконано наступну умову:

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

де  $P_{i,j}^{n+1}$  – нова величина потенціалу;  $P_{i,j}^n$  – попереднє значення потенціалу;  $\varepsilon$  – невелике число.

Розсіювання забруднювальних речовин біля дороги моделюють на основі наступного рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (5) \end{aligned}$$

де  $C$  – середня концентрація;  $u, v$  – складові швидкості вітру;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коефіцієнти дифузії;  $Q_i$  – швидкість випромінювання;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функція Дірака;  $t$  – час.

Початкові та граничні умови для рівняння (4) описано у [1–3].

Перед розв'язанням рівняння (5) ми зробили його фізичне розбиття на послідовність із трьох рівнянь. Це такі рівняння:

$$\begin{aligned} 1) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0; \\ 2) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ 3) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned}$$

де  $\delta(r - r_i)$  – дельта-функція Дірака;  $r_i = (x_i, y_i)$  – координати точкового джерела.

Перше рівняння системи розщеплення описує перенесення забруднювальних речовин по траєкторіях. Друге рівняння системи описує дифузійне розсіювання забруднювача. Третє рівняння системи описує зміну концентрації під дією джерела  $Q$ .

Для чисельного інтегрування використовують такі залежності:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \\ \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}; \\ u^+ &= \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \\ v^+ &= \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}; \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}; \end{aligned}$$

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

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

Схему розщеплення для рівняння конвективного переносу записують так:

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

Невідоме значення  $C$  в кожному рівнянні визначають за формулою біжного рахунку.

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовують двоетапну різницеву схему розщеплення, яка має вигляд:

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

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

Для кодування різницевого рівняння ми використовували мову FORTRAN.

Перебування біля траси створює ризик появи захворювань у людини. Значення цього ризику розраховано на базі наступної емпіричної моделі (В. Т. Алимов, Н. П. Тарасова):

$$Risk = 1 - \exp(-0,174 \cdot (\frac{C}{ГДК \cdot K_3})^\beta \cdot t),$$

де  $K_3=3$ ;  $\beta=0,86$ ;  $t$  – час;  $C$  – концентрація небезпечної речовини в точці розташування реципієнта.

## Результати

Побудовану чисельну модель було використано для розрахунку концентрації  $NO$  біля дороги. Чисельний експеримент проведено для трьох сценаріїв. Ескізи обчислювальної зони для цих сценаріїв показано на рис. 1 – 3. Перший сценарій – це відсутність бар'єру, існує лише «поріг» біля краю автодороги. Другий сценарій – застосування бар'єру, який має Т-подібну форму. Третій сценарій – вертикальний бар'єр, що має додатковий елемент із нахилом вертикальної плити.

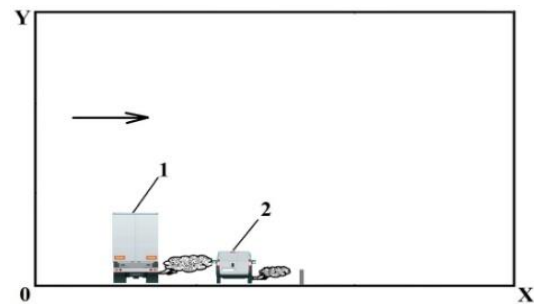


Рис. 2. Схема розрахункової зони, сценарій № 1:  
1 – авто; 2 – авто

Fig. 2. Scheme of the calculation area, scenario № 1:  
1 – auto; 2 – auto

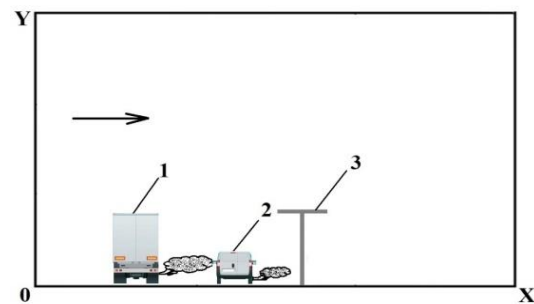


Рис. 3. Схема розрахункової області, сценарій № 2:  
1 – авто; 2 – авто; 3 – бар'єр

Fig. 3. Scheme of the calculation area, scenario № 2:  
1 – auto; 2 – auto; 3 – barrier

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

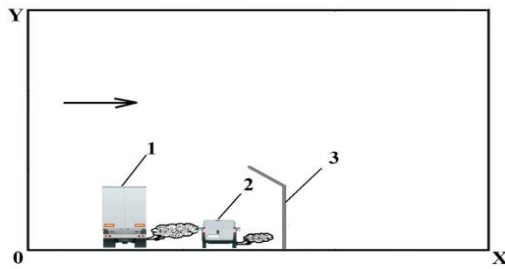


Рис. 4. Схема розрахункової зони, сценарій № 3:  
1 – авто; 2 – авто; 3 – бар'єр

Fig. 4. Scheme of the calculation area, scenario № 3:  
1 – auto; 2 – auto; 3 – barrier

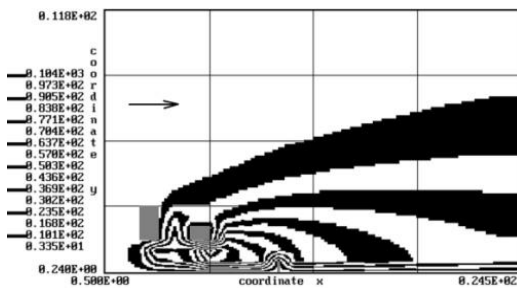


Рис. 5. Зона забруднення біля автошляху,  
сценарій № 1

Fig. 5. Pollution zone near the highway, scenario № 1

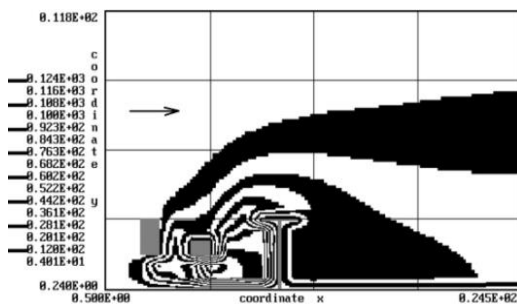


Рис. 6. Зона забруднення біля автошляху,  
сценарій № 2

Fig. 6. Pollution zone near the highway, scenario № 2

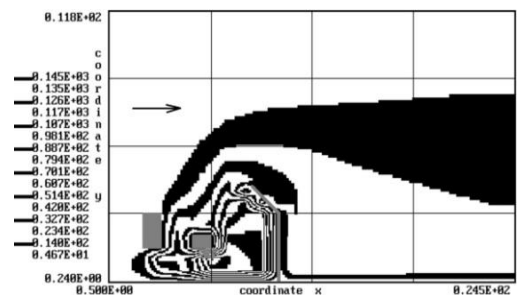


Рис. 7. Зона забруднення біля автошляху,  
сценарій № 3

Fig. 7. Pollution zone near the highway, scenario № 3

Результати чисельного моделювання показують, що наявність бар'єрів суттєво впливає на деформацію зони забруднення. Значний градієнт концентрації домішки має місце перед бар'єрами. Це пов'язано з тим, що бар'єр створює перешкоду на шляху руху домішки з повітряним потоком. Як можемо бачити з рис. 7, використання вертикального бар'єру з додатковим елементом, що має ухил, дозволяє зменшити розміри зони забруднення за бар'єром.

Далі наведено результати оцінювання ризику появи захворювань у людини. За точку перебування реципієнта було обрано точку на відстані 7 м від автодороги та на висоті 1,7 м.

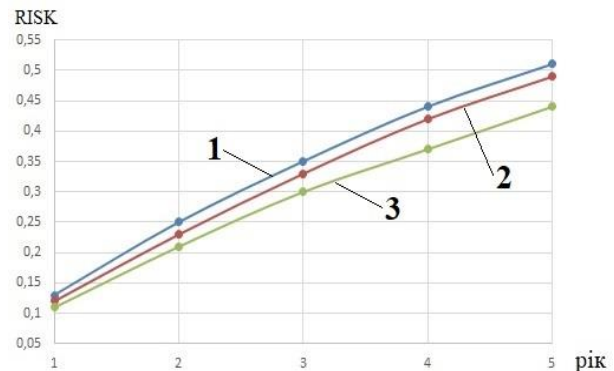


Рис. 8. Зона забруднення біля автошляху,  
1 – сценарій № 1; 2 – сценарій № 2; 3 – сценарій № 3

Fig. 8. Risk of disease:

1 – scenario № 1; 2 – scenario № 2; 3 – scenario № 3

Аналіз даних, наведених на рис. 8, показує, що використання вертикального бар'єру з додатковим елементом, що має ухил, дозволяє зменшити ризик появи захворювань порівняно з бар'єром, що має Т-подібну форму.

Варто відзначити, що час обчислення становив близько 5 секунд для кожного сценарію.

### Наукова новизна та практична значимість

Розроблено модель для розрахунку ефективності всмоктування забрудненого повітря біля дороги. Числова модель базується на застосуванні рівняння масопереносу та рівняння потенційної течії.

Особливістю розробленої моделі є швидкий розрахунок забруднених зон біля доріг.

### Висновки

Розроблено чисельну модель для оцінки ефективності всмоктування забрудненого повітря біля дороги. На основі моделі потенційного потоку було розраховано режим вітру біля дороги. Для розв'язання рівняння потенціалу потоку використано метод Лібмана. Це дозволяє швидко розрахувати режим вітру біля дороги.

Для прогнозування концентрації газу поблизу дороги було використано рівняння масообміну. Чисельне інтегрування цього рівняння виконано за неявною різницевою схемою.

Подальше удосконалення моделі потрібно здійснювати в напрямі створення чисельної 3D-моделі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. CFD прогнозирование процесса загрязнения воздушной среды на улицах. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 17. С. 188–194.
2. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Кириченко П. С. *Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов*. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 159 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
4. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
5. Chang C.-H., Lin J.-S., Cheng C.-M., Hong Y.-S. Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and technology*. 2013. Vol. 21. Iss. 2. P. 119–126.
6. Düring I., Bächlin W., Ketzler M., Baum A., Friedrich U., Würzler S. A new simplified NO/NO<sub>2</sub> conversion model under consideration of direct NO<sub>2</sub>-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*. 2011. Vol. 20. Iss. 1. P. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0491>
7. Hagler G. S. W., Tang W., Freeman M. J., Heist D. K., Perry S. G., Vette A. F. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45. P. 2522–2530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>
8. Hashad K., Steffens J. T., Baldauf R. W., Heist D. K., Deshmukh P., Zhang K. M. Resolving the effect of roadside vegetation barriers as a near-road air pollution mitigation strategy. *Environmental Science: Advances*. 2024. Vol. 3. Iss. 3. P. 411–421. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3va00220a>
9. Huertas J. I., Aguirre, J. E. Lopez Mejia O. D., Lopez C. H. Design of Road-Side Barriers to Mitigate Air Pollution near Roads. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052391>
10. Huertas J. I., Prato D. F. CFD Modeling of Near-Roadway Air Pollution. *Environmental Modeling & Assessment*. 2020. Vol. 25. P. 129–145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09666-w>
11. Lin C., Ooka R., Kikumoto H., Flageul C., Kim Y., Wang Y., ..., Sartelet K. Large-eddy simulations on pollutant reduction effects of road-center hedge and solid barriers in an idealized street canyon. *Building and Environment*. 2023. Vol. 241. P. 110464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110464>
12. Nguyen T. N., Nguyen T. C., Nguyen V. T. Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons. *Advanced science and technology letters*. 2015. Vol. 120. P. 770–777. DOI: <https://doi.org/10.14257/astl.2015.120.152>
13. Overman H. T. *Simulation model for NO<sub>x</sub> distributions in a street canyon with air purifying pavement*: Master thesis. University Twente, Netherlands, 2009. 107 p.

V. M. KUZNETSOV<sup>1</sup>, V. V. BILIAIEVA<sup>2</sup>, O. V. BERLOV<sup>3\*</sup>, O. V. ZVONAROVA<sup>4</sup>,  
P. B. MASHYKHINA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dep. of «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

<sup>2</sup>Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMetI, Science Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>3\*</sup>Dep. of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup>Dep. of «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

<sup>5</sup>Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

## Mathematical Modeling of Air Pollution Near Roads and Assessment of Disease Risk in People Exposed to Vehicle Emissions

**Purpose.** The work is aimed at developing a numerical 2D model that allows for the rapid calculation of the absorption of polluted air near the road. A fast CFD model should take into account meteorological parameters, a suction pipe near the road to remove polluted air, and the rate of toxic gas emissions. **Methodology.** The developed model is based on the potential flow equation and the pollutant mass transfer equation. The potential flux equation is used to calculate the wind flow near the road in the case of a suction pipe. The Liebman numerical integration method was used to solve the potential flow equation. To solve the convective-diffusive dispersion equation, an implicit variable-triangular difference scheme was used. The numerical integration is carried out using a rectangular difference grid. The porosity method (“marker method”) was used to create the shape of the complex computational zone. Toxic gas emissions from a car were modeled using the Dirac delta function for a point source. **Findings.** The developed numerical 2D model takes into account the main physical factors that affect the process of dispersion of pollutants near the road. The model takes into account the influence of a car and a suction pipe located near the road to remove polluted air. On the basis of the developed numerical models, a computational experiment was conducted to assess the impact of the use of a suction pipe on local air pollution near the road. **Originality.** The developed numerical model allows to calculate a two-dimensional flow pattern near the road, where such a mitigation measure as a suction pipe is used. The model allows for quick calculations of air pollution, taking into account the impact of the protective barrier. Based on the data on the distribution of the concentration of a non-hazardous substance, the risk of disease in a person exposed to vehicle emissions was determined. **Practical value.** The software implementation of the developed numerical model was carried out, and a computational experiment was conducted to illustrate the effectiveness of using the model to solve applied problems. The results of the numerical experiment are presented.

*Key words:* air pollution; city street; pollution dispersion; numerical modeling; suction pipe

### REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Rusakovaa, T. I., & Kirichenko, P. S. (2014). *Modelirovanie zagryazneniya atmosfernogo vozdukhа vybrosami avtotransporta na ulitsakh gorodov*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Rusakova, T. I. (2013). CFD prediction of air pollution in the streets. *Ecology and nature management*, 17, 188-194. (in Russian)
3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
4. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
5. Chang, C.-H., Lin, J.-S., Cheng, C.-M., & Hong, Y.-S. (2013). Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and technology*, 21(2), 119-126. (in English)
6. Düring, I., Bächlin, W., Ketzler, M., Baum, A., Friedrich, U., & Wurzler, S. (2011). A new simplified NO/NO<sub>2</sub> conversion model under consideration of direct NO<sub>2</sub>-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(1), 67-73. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0491> (in English)

7. Hagler, G. S. W., Tang, W., Freeman, M. J., Heist, D. K., Perry, S. G., & Vette, A. F. (2011). Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*, 45(15), 2522-2530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030> (in English)
8. Hashad, K., Steffens, J. T., Baldauf, R. W., Heist, D. K., Deshmukh, P., & Zhang, K. M. (2024). Resolving the effect of roadside vegetation barriers as a near-road air pollution mitigation strategy. *Environmental Science: Advances*, 3(3), 411-421. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3va00220a> (in English)
9. Huertas, J. I., & Prato, D. F. (2019). CFD Modeling of Near-Roadway Air Pollution. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(1), 129-145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09666-w> (in English)
10. Huertas, J. I., Aguirre, J. E., Lopez Mejia, O. D., & Lopez, C. H. (2021). Design of Road-Side Barriers to Mitigate Air Pollution near Roads. *Applied Sciences*, 11(5), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052391> (in English)
11. Lin, C., Ooka, R., Kikumoto, H., Flageul, C., Kim, Y., Wang, Y., Maison, A., Zhang, Y., & Sartelet, K. (2023). Large-eddy simulations on pollutant reduction effects of road-center hedge and solid barriers in an idealized street canyon. *Building and Environment*, 241, 110464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110464> (in English)
12. Nguyen, T. N., Nguyen, T. C., & Nguyen, V. T. (2015). Numerical Simulation of Wind Flow and Pollution Transport in Urban Street Canyons. *Advanced Science and Technology Letters*, 120, 770-777. DOI: <https://doi.org/10.14257/astl.2015.120.152> (in English)
13. Overman, H. T. (2009). *Simulation model for NO<sub>x</sub> distributions in a street canyon with air purifying pavement* (Master thesis). University Twente, Netherlands. (in English)

Надійшла до редколегії: 20.11.2024

Прийнята до друку: 27.03.2025

## UDC 628.35: 519.87

П. Б. МАШИХІНА<sup>1</sup>, М. М. БІЛЯЄВ<sup>2\*</sup>, А. В. КАЛАШНИКОВ<sup>3</sup>, В. В. ЦУРКАН<sup>4</sup>,  
ЗАУР НАБІЄВ<sup>5</sup>, Б. В. СЕРЕДІН<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

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

<sup>3</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта therealkalash@gmail.com, ORCID 0009-0001-8671-0446

<sup>4</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта vlad.cyrkan@gmail.com, ORCID 0009-0007-5733-6022

<sup>5</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта zaurnabiev27@gmail.com, ORCID 0009-0004-3302-4081

<sup>6</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта seredin\_021181@ukr.net, ORCID 0009-0000-5489-9355

## Швидкорозрахункові моделі в задачах водокористування

**Мета.** На етапі ескізного проектування різноманітних споруд у системах водопостачання та водовідведення потрібно мати комплекс математичних моделей для проведення серійних розрахунків з оцінювання ефективності роботи цих споруд у різних умовах. Потрібні математичні моделі, що враховують основні фізичні фактори. Такими моделями є математичні моделі гідродинаміки та масопереносу. Складність математичної постановки задач масопереносу для систем водопостачання та водовідведення полягає у використанні чисельних методів. Це пов'язано з тим, що у фундаментальних моделях механіки суцільного середовища застосовують багатofакторні диференціальні рівняння. Для практичного використання особливо важливо мати швидкорозрахункові чисельні моделі, щоб провести серійні розрахунки протягом робочого дня. Основною метою роботи є розробка швидкорозрахункових чисельних моделей для розв'язання комплексу задач у галузі водопостачання та водовідведення. **Методика.** Під час розв'язання задач масопереносу використовують фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища: рівняння для потенціалу швидкості, рівняння фільтрації, рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь використовують скінченнорізницеві схеми розщеплення. Побудову скінченнорізницевої схем здійснюють так, щоб отримати рівняння, для розв'язання яких можна застосувати явні формули. Чисельне інтегрування моделювальних рівнянь здійснюють на прямокутній різницевої сітці. **Результати.** Розроблено комплекс чисельних моделей, що може бути використаний на етапі ескізного проектування споруд систем водопостачання та водовідведення. Побудовані чисельні моделі враховують основні фізичні фактори, що впливають на процеси масопереносу в цих спорудах. **Наукова новизна.** Запропоновано комплекс математичних моделей для дослідження багатofакторних процесів масопереносу в спорудах водопостачання та водовідведення. Чисельні моделі враховують конвективно-дифузійний процес поширення домішки. **Практична значимість.** Побудовані чисельні моделі можуть бути використані під час проектування напірних фільтрів, водозаборів та споруд для нейтралізації стічних вод.

**Ключові слова:** водокористування; математичне моделювання; фільтр; водозабір; нейтралізація стічних вод; обчислювальний експеримент

### Вступ

Ефективність розв'язання сучасних технічних задач у значній мірі залежить від використання спеціальних математичних моделей.

У галузі водокористування математичні моделі відіграють значну роль, оскільки для дослідження багатьох процесів потрібне коштовне обладнання та значний час. Наприклад, дослі-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

дження процесів біологічного очищення стічних вод у лабораторних умовах може тривати тижнями. Тому в галузі водокористування, особливо на етапі ескізного проектування, важливо мати швидкозрахункові моделі (Quick computing models). Такий результат можна отримати в разі використання емпіричних або аналітичних моделей [3, 5–8]. Вони дають можливість проаналізувати режим роботи багатьох споруд у галузі водокористування. Але ці методи не враховують складну форму споруд, нерівномірність руху водного потоку. Тому особливий інтерес становлять чисельні моделі [1, 2, 9–11, 12–14]. Створення чисельних моделей відповідає сучасним трендам у галузі водокористування.

### Мета

Основною метою статті є розробка Screening Models для чисельного розв'язання задач в галузі водокористування, зокрема гідродинаміки та масопереносу у фільтрах, у спорудах нейтралізації стічних вод, поширення домішки біля руслового водозабору.

### Методика

Розглядаємо декілька задач у галузі водокористування, для розв'язання яких використовують метод чисельного моделювання.

*Моделювання роботи водозабору.* Для аналізу процесу поширення домішки в річці під час роботи водозабору (рис. 1) використовують 2D-рівняння масопереносу домішки в поверхневому водоймищі (рівняння осереднено за глибиною водойми) [1, 2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q\delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація домішки у водоймищі;  $u, v$  – проєкції вектора швидкості потоку у споруді;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти дифузії;  $t$  – час.



Рис. 1. Русловий водозабір  
(<https://cutt.ly/ee6dI12D>)

Fig. 1. Channel water intake  
(<https://cutt.ly/ee6dI12D>)

Для рівняння масопереносу ставлять такі граничні умови:

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

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

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

- 3) на твердих поверхнях:

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

де  $n$  – одинична нормаль до твердої поверхні.

Початкова умова для рівняння масопереносу така: за  $t=0$   $C=C_0$ ,  $C_0$  – відома концентрація домішки.

Для моделювання роботи водозабору потрібно визначити поле швидкості водного потоку, оскільки «всмоктування» води водозабором змінює поле швидкості в руслі. Для розв'язання гідродинамічної задачі використовують модель нев'язкого руху рідини [1, 2]:

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

де  $P$  – потенціал швидкості.

Граничні умови для моделювального рівняння (2) розглянуто в [1, 2].

Компоненти вектора швидкості потоку визначають так [2]:

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

Таким чином, математична модель процесу руху домішки у водоймищі під час роботи водозабору базується на розв'язанні рівнянь (1) і (2) з відповідними крайовими умовами.

Для чисельного інтегрування рівнянь моделі використовують скінченнорізницеві схеми. Моделювання здійснюють на прямокутній різницевій сітці. Чисельне інтегрування рівняння гідродинаміки (2) здійснюють за змінно-трикутним методом. Для цього рівняння Лапласа (2) записують так:

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

де  $t$  – фіктивний час.

Далі використовуємо двокрокову схему розщеплення змінно-трикутного методу:

– на першому кроці:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2};$$

– на другому кроці:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}.$$

Таким чином, потенціал швидкості визначаємо у два етапи.

Значення компонент швидкості водного потоку знаходимо так:

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}; \quad v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}. \quad (5)$$

Відзначимо, що в зоні розташування водозабору потрібно задати швидкість водного потоку, що потрапляє в систему водопостачання.

Для чисельного інтегрування рівняння (1) використовуємо таку схему розщеплення:

– перший крок ( $k=1/4$ ):

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

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

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

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

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

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

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

Пояснення для різницевих операторів  $L_x, L_y, \dots$  наведено в [4].

Моделювання процесу нейтралізації стічних вод. Метод нейтралізації стічних вод є досить ефективним засобом їх обробки (рис. 2).



Рис. 2. Установка для нейтралізації стоків  
(<https://cutt.ly/Je6dvPIL>)

Fig. 2. Installation for neutralization of wastewater  
(<https://cutt.ly/Je6dvPIL>)

Розглядаємо процес, коли, крім забруднених стічних вод, до спеціальної споруди також потрапляє нейтралізатор. Для моделювання процесу нейтралізації забруднених стічних вод у споруді використовуємо такі рівняння:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) = 0; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \\ + Q\delta(x - x_i)\delta(y - y_i); \quad (8) \end{aligned}$$

$$Pollut + Neutr \rightarrow A + B... \quad (9)$$

де  $P$  – потенціал швидкості;  $C$  – концентрація забруднювача в стічних водах, що потрапляють на нейтралізацію;  $N$  – концентрація нейтралізатора;  $Q$  – інтенсивність подачі нейтралізатора;  $x_i, y_i$  – координати подачі нейтралізатора в споруді.

Рівняння (9) – це схематичний запис стехіометричного співвідношення, що відповідає реакції нейтралізації в середині споруди.

Граничні умови для моделювальних рівнянь наведено в [1, 2].

Для чисельного інтегрування рівняння гідродинаміки (6) використовуємо таку явну різницеву схему:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (10)$$

Значення  $P_{i,j}$  визначаємо за допомогою явної залежності з рівняння (10).

На наступному етапі розраховуємо компоненти вектора швидкості потоку на гранях різницевої комірки:

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}; \quad v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}.$$

Після розрахунку поля швидкості потоку стічних вод розв'язуємо рівняння (7) і (8) для визначення динаміки зміни концентрації забруднювача та нейтралізатору в споруді.

Методику розв'язання цих рівнянь розглянемо на прикладі рівняння (7). Для побудови чисельної моделі процесу здійснюємо розщеплення рівняння (7) таким чином:

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

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

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

Для першого рівняння скінченнорізницева схема розщеплення має вигляд:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Пояснення для різницевої операторів  $L_x, L_y...$  наведено в [4].

Для другого рівняння системи двокрокова схема розщеплення має вигляд:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

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

Для чисельного інтегрування третього рівняння системи використовуємо метод Ейлера.

*Моделювання роботи фільтра.* Для моделювання процесу очищення води в напірному фільтрі (рис. 3) використовуємо такі рівняння:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \left( \frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right); \quad (12)$$

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

де  $h$  – напір;  $k$  – коефіцієнт фільтрації;  $\mu$  – нестача насичення (водовіддача);  $u, v$  – компоненти швидкості підземного потоку;  $S$  – концентрація домішки в потоці;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти дисперсії;  $t$  – час.



Рис. 3. Напірний фільтр (<https://cutt.ly/de6dlL6k>)

Fig. 3. Pressure filter (<https://cutt.ly/de6dlL6k>)

Чисельне розв'язання рівняння фільтрації здійснюємо за допомогою такої двокрокової схеми розщеплення:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

$$\text{де } a = \frac{k}{\mu}.$$

Для чисельного інтегрування рівняння переносу здійснюємо його розщеплення таким чином:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right); \quad (13)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right). \quad (14)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (13) використовуємо таку схему розщеплення:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

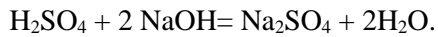
$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

Аналогічно записуємо схему розщеплення для рівняння (14).

Здійснено програмну реалізацію розглянутих чисельних моделей.

## Результати

Далі наведено результати обчислювального експерименту. Розглядаємо процес нейтралізації стічних вод, що містять сірчану кислоту. Для нейтралізації здійснюємо подачу розчину NaOH. Реакцію взаємодії записуємо так:



Розглянуто такі сценарії:

1. Сценарій № 1: відсутня подача нейтралізатора в камеру змішування.
2. Сценарій № 2: подача нейтралізатора в камеру змішування відбувається в двох місцях (місце подачі нейтралізатора показано на рис. 5 червоним «колом»).
3. Сценарій № 3: подача нейтралізатора в камеру змішування відбувається у трьох місцях (місце подачі нейтралізатора показано на рис. 6 червоним «колом»).

Відзначимо, що кожне число на рисунках показує значення концентрації кислоти у відсотках від максимального значення концентрації в розрахунковій зоні. Це значення дорівнює «99». Також слід мати на увазі, що значення «0» показує, що має місце повна нейтралізація кислоти в цій частині робочої камери.

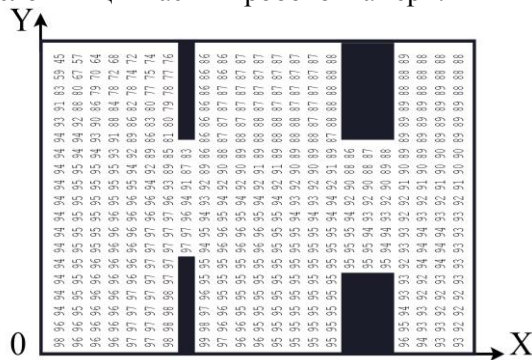


Рис. 4. Поле концентрації домішки в робочій камері за відсутності подачі нейтралізатора, сценарій № 1

Fig. 4. Impurity concentration field in the working chamber in the absence of neutralizer supply, scenario No. 1

Як можемо бачити з рис. 4, за відсутності подачі нейтралізатора в камері змішування має місце висока концентрація кислоти в стічних водах. Різниця в значенні концентрації кислоти в різних частинах робочої камери обумовлена процесом конвекції і дифузії та впливом «геометрії» в середині робочої камери.

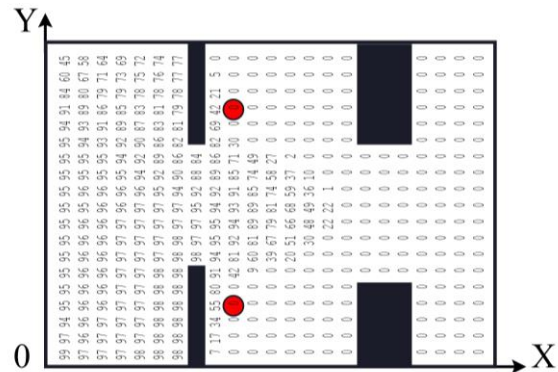


Рис. 5. Поле концентрації домішки у споруді за подачі нейтралізатора, сценарій № 2

Fig. 5. Impurity concentration field in the building at the neutralizer supply, scenario No. 2

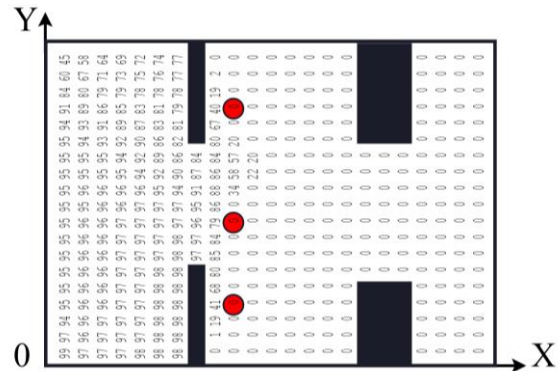


Рис. 6. Поле концентрації домішки у споруді за подачі нейтралізатора, сценарій № 3

Fig. 6. Field of impurity concentration in the building at the neutralizer supply, scenario No. 3

Якщо порівняти рис. 5 і 6, можна побачити, що розташування додаткового елемента, що здійснює подачу нейтралізатора, зокрема розташування його посередині камери, дозволяє суттєво підвищити ефективність нейтралізації стічних вод.

Відзначимо, що час розрахунку склав 3 с.

## Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано комплекс чисельних моделей для дослідження багатофакторних процесів масопереносу в спорудах водокористування.

Побудовані чисельні моделі можуть бути використані на етапі ескізного проєктування споруд систем водокористування для оцінювання їх ефективності.

**Висновки**

1. Розроблено чисельну модель для розрахунку процесу очищення води в напірному фільтрі.

2. Розроблено чисельну модель процесу масопереносу в річці під час роботи водозабору.

3. Запропоновано чисельну модель процесу нейтралізації стічних вод.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках*. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
2. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения*. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення*. Київ : Укреліотех, 2010. 272 с.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
5. Ковальчук В. А. *Очистка стічних вод*. Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделирование очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповіді Національної академії наук України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
7. Олейник А. Я., Киселев С. К., Малько В. Ф., Ягодковская О. Н. Методика инженерного расчета вторичных вертикальных отстойников. *Проблемы водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2006. № 7. С. 65–82.
8. Pereda M., Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (Corfu, 20–23 June 2011). Corfu, 2011. P. 1128–1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>
9. Pirsahab M., Mohammadi M., AbdollahDargahi, Almasi A., Naderi M. Modeling and kinetic evaluation of intermittent aeration bioreactor with continuous flow in hospital wastewater treatment. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 2016. Vol. 9. Iss. 4. P. 1–9.
10. Prades Martell, L. *Computational fluid dynamics techniques for fixed-bed biofilm systems modeling : numerical simulations and experimental characterization ...* Doctoral Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2018. 201 p. DOI: <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-125845>
11. Ramalingam K., Xanthos S., Gong M., Fillos J., Beckmann K., Deur A., McCorquodale J. A. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*. 2012. Vol. 65. Iss. 6. P. 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2012.944>
12. Robescu Dan, Mandiş C., Robescu, Diana. Design Lamellar Secondary Settling Tank Using Numerical Modeling. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 72. Iss. 4. P. 211–216.
13. Robescu Dan, Robescu Diana, Mocanu R., Moga C. Modeling of attached growth biological wastewater treatment process. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*. 2007. Vol. 64. Iss. 4. P. 593–598.
14. Shahrokhi M., Rostami F., Md Said M. A., Syafalni. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks. *2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE*. 2011. Vol. 6. P. 392–396.

P. B. MASHYKHINA<sup>1</sup>, M. M. BILIAIEV<sup>2\*</sup>, A. V. KALASHNYKOV<sup>3</sup>, V. V. TSURKAN<sup>4</sup>,  
ZAUH NABIIEV<sup>5</sup>, B. V. SIERIEDIN<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>2\*</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>3</sup>Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail therealkalash@gmail.com, ORCID 0009-0001-8671-0446

<sup>4</sup>Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail vlad.cyrkan@gmail.com, ORCID 0009-0007-5733-6022

<sup>5</sup>Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail zaurnabiev27@gmail.com, ORCID 0009-0004-3302-4081

<sup>6</sup>Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail seredin\_021181@ukr.net, ORCID 0009-0000-5489-9355

## Fast Computational Models in Water Use Problems

**Purpose.** At the stage of preliminary design of various structures in water supply and wastewater systems, it is necessary to have a set of mathematical models to perform serial calculations to assess the efficiency of these structures in different conditions. Mathematical models are needed that take into account the basic physical factors. Such models are mathematical models of hydrodynamics and mass transfer. The complexity of the mathematical formulation of mass transfer problems for water supply and wastewater treatment systems lies in the use of numerical methods. This is due to the fact that multifactor differential equations are used in fundamental models of continuum mechanics. For practical use, it is especially important to have fast numerical models to perform serial calculations during a working day. The main purpose of this work is to develop fast-calculating numerical models for solving a set of problems in the field of water supply and sewerage. **Methodology.** The fundamental equations of continuum mechanics are used to solve mass transfer problems: the equation for the velocity potential, the filtration equation, and the equation for convective-diffusive impurity transfer. Finite difference schemes are used for numerical integration of the modeling equations. The construction of finite-difference schemes is carried out in such a way as to obtain equations for which explicit formulas can be used to solve. The numerical integration of the modeling equations is carried out on a rectangular difference grid. **Findings.** A set of numerical models has been developed that can be used at the stage of preliminary design of water supply and wastewater treatment facilities. The constructed numerical models take into account the main physical factors that affect the processes of mass transfer in these structures. **Originality.** A set of mathematical models is proposed to study multifactorial mass transfer processes in water supply and sewage facilities. Numerical models take into account the convective diffusion process of impurity propagation. **Practical value.** The constructed numerical models can be used in the design of pressure filters, water intakes, and wastewater neutralization facilities.

**Keywords:** water use; mathematical modeling; filter; water intake; wastewater neutralization; computational experiment

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., & Nahorna, O. K. (2012). *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v otstoinikakh sistem vodootvedeniya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
2. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. A. (2015). *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v gorizontalnykh otstoinikakh*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Vasylenko, O. A., Grabovsky, P. O., Larkina, G. M., Polishchuk, O. V., & Progulny, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia*. Kyiv: Ukrheliotekh. (in Ukrainian)

4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
5. Kovalchuk, V. A. (2002). *Ochystka stichnykh vod*. Rivne: VAT «Rivnenska drukarnia». (in Ukrainian)
6. Oliinyk, O. Ya., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Oleinik, A. Ya., Kiselev, S. K., Malko, V. F., & Yagodovskaya, O. N. (2006). Metodika inzhenerного rascheta vtorichnikh vertikalnikh otstoinikov. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 7, 65-82. (in Russian)
8. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011, June). Agent-based modeling of an activated sludge process in a batch reactor. In *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (pp. 1128-1133). Corfu, Greece. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)
9. Pirsahab, M., Mohammadi, M., AbdollahDargahi, Almasi, A., & Naderi, M. (2016) Modeling and kinetic evaluation of intermittent aeration bioreactor with continuous flow in hospital wastewater treatment. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(4), 1-9. (in English)
10. Prades Martell, L. (2018). *Computational fluid dynamics techniques for fixed-bed biofilm systems modeling : numerical simulations and experimental characterization* (Doctoral thesis). Universitat Politècnica de Catalunya. DOI: <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-125845> (in English)
11. Ramalingam, K., Xanthos, S., Gong, M., Fillos, J., Beckmann, K., Deur, A., & McCorquodale, J. A. (2012). Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 65(6), 1087-1094. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2012.944> (in English)
12. Robescu Dan, Mandiș C., Robescu, Diana. (2010). Design Lamellar Secondary Settling Tank Using Numerical UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 72(4), 211-216. (in English)
13. Robescu, Dan, Robescu, Diana, Mocanu, R., & Moga, C. (2007). Modeling of attached growth biological wastewater treatment process. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 64(4), 593-598. (in English)
14. Shahrokhi, M., Rostami, F., Md Said., M. A., & Syafalni. (2011). The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks. In *2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE* (Vol. 6, pp. 392-396). (in English)

Надійшла до редколегії: 02.12.2024

Прийнята до друку: 28.03.2025

**UDC 621.6.033:623.1-049.65**

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

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

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

<sup>3</sup>Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport», JSC «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, Ukraine, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>4\*</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>5</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

## Evaluation of gabions usage effectiveness for industrial facilities protection against damage

**Purpose.** In the extreme situations at industrial sites, various damaging factors may appear, such as the spread of toxic substances in the air, the creation of a fireball, etc., which pose a threat to the lives of workers and have a significant negative impact on the environment. That is why today, special attention is being paid to the problems associated with the spread of debris during a drone attack. At an industrial site where oil product storage facilities are located, the debris generated during an explosion can damage the tank building and cause a fire. In this regard, the main objective of the study is to evaluate the effectiveness of using gabion to reduce the risk of damage to the oil storage facility during the movement of drone debris. **Methodology.** To achieve this goal, the paper considers the problem of flying debris in the event of a drone explosion at an industrial site where oil storage facilities are located. The use of gabion with sand is proposed to protect the tank building from the throwing effect of debris. It is proposed to develop a mathematical model of the movement of a fragment in the path of which the gabion is located. The effect of gabion as a protective screen on reducing the air temperature near a neighboring oil storage facility in the event of a fire at an industrial site is also considered. A model of the dynamics of a point motion (Newton's second law) was used to mathematically describe the movement of the debris. Numerical integration of the modeling equations was performed using the Euler's method. The energy equation was used to model the process of thermal air pollution at an industrial site during a fire. **Findings.** In this work, the numerical model was programmed and a computer code was created. The programming language is FORTRAN. The code provides information on the speed of the fragment movement in different parts of each zone. On the basis of the constructed numerical model and the created code, parametric studies were carried out to determine the effectiveness of using gabion with sand to protect the oil storage facility from the effects of fragment. As an approximation, the case when the fragment after the explosion moves horizontally in the direction of the object was considered. The influence of the gabion height on the heating level of the wall of the oil storage facility located at an industrial site was analyzed. **Originality.** An effective mathematical model has been developed to evaluate the effectiveness of using gabion to protect the oil storage facility from damage by drone fragment. The proposed model allows determining the rational dimensions of the gabion to reduce the risk of damage to the tank wall. An effective computer model of thermal air pollution at an industrial site in the event of a fire at an oil storage facility is presented. **Practical value.** On the basis of the constructed mathematical model, a computer code was created to conduct a computational experiment to determine the effectiveness of using protective barriers (gabions) on the territory of an industrial site.

*Key words:* risk of damage; dynamics of fragment movement; gabion; mathematical modeling; thermal contamination

### Introduction

Extreme situations on the territory of industrial facilities and transport pose a threat to the lives of workers and have a significant negative impact on the environment [1, 7, 10, 11]. In extreme situations

at industrial sites, various shocking factors may appear, for example, the appearance of toxic substances in the air, the creation of a fireball, etc. [1]. In the event of explosions at an industrial site, there is a scattering of fragment that creates a risk of damage to personnel and facilities due to the movement

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

of fragment at a high speed. The problem of risk analysis in the event of extreme situations involves solving two important tasks - determining the areas of damage and developing protective methods to reduce the consequences of an extreme situation

It should be noted that in the future, special attention will be paid to the problems associated with the dispersal of fragment during drone attacks. If there is such an extreme situation at an industrial site where oil storage facilities are located, the fragment generated by the explosion may damage the oil storage facility's building. This will lead to the release of fire products at the industrial site, the release of fire products into the atmosphere and the appearance of thermal pollution of the environment. Thus, it is very important to develop means of protecting oil storage facilities in the event of flying fragment from drone explosions.

It should be noted that to solve this problem, it is possible to use gabions as obstacles to the movement of fragment. These structures are widely used in the world to form the landscape of parks, to build roads, to strengthen slopes as retaining walls or as elements of culverts [5, 6, 8, 9]. The advantage of gabions is that they are filled with materials that do not require significant funds. These structures can have different shapes and sizes, which is very important for their practical use. The most important thing is that local materials can be used to fill them. It is clear that such structures have found their place in the military to protect against damage (Fig. 1, Fig. 2).



Fig. 1. Axial gabion (<https://cutt.ly/Ge6IYzQ3>)



Fig. 2. Axial gabion (<https://cutt.ly/me6IYClq>)

For scientific substantiation of gabion parameters, separate calculations are always required. An analysis of existing scientific publications has shown that they consider methods for calculating the stability of gabions when used as retaining walls, calculating the deformation of gabions, determining their dimensions and the amount of material to be filled [5, 8, 9]. In the direction of studying the effectiveness of using gabions for protection against damage to oil storage facilities, we can identify work [2], which considers the calculation of gabions with different fillings – sawdust, oilcake, dry earth. Also, the results of research in the field of protection of oil storage facilities from damage are presented in [3], where the effectiveness of using a metal plate as an obstacle to the movement of a fragment is analyzed. It should be noted that the range of scientific works in this area is extremely limited. Thus, this gives grounds for conducting scientific research to improve the protection systems of oil storage facilities at industrial sites in the event of drone explosions.

### Purpose

The purpose of this article is:

1. Evaluation of the effectiveness of using gabion with sand to reduce the risk of damage to oil storage facilities at industrial sites of mining enterprises during the movement of drone fragment.
2. Assessment of thermal damage zones at an industrial site in case of burning of a storage facility with oil products.

### Methodology

The paper considers the problem of flying fragment in the event of a drone explosion at an industrial site where oil storage facilities are located. The use of gabion with sand is proposed to protect the tank building from the throwing effect of the fragment. The task is to develop a mathematical model of the movement of a fragment in the path of which the gabion is located.

The fragment generated by a drone explosion has a different geometric shape, mass, and speed.

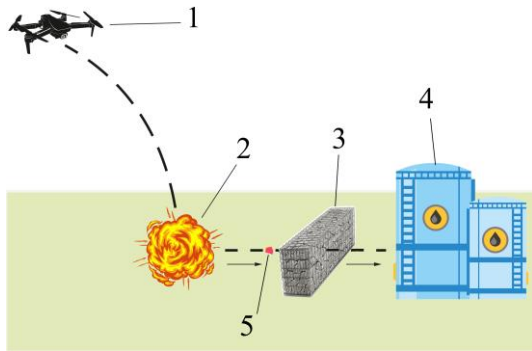


Fig. 3. Location of the gabion on the industrial site:  
1 – drone; 2 – explosion site; 3 – gabion;  
4 – oil storage facility

In addition, these fragments can be formed at different heights and move at different angles to the object to be protected (hereinafter referred to as the object). To build a mathematical model of the fragment movement and its interaction with the protective barrier body (gabion), we make the following assumptions:

- 1) the fragment has a cone shape;
- 2) the mass of the wreckage is known;
- 3) the speed and direction of the fragment from the point of explosion are known;
- 4) the length from the fragment impact point to the gabion and the object is known;
- 5) The angle of  $\alpha$  the fragment relative to the ground is known;
- 6) the density of the  $\rho_{cm}$  material of the protective barrier (gabion) is known.

The trajectory of the fragment from the explosion site to the object is divided into three parts:

- 1) zone 1 - from the explosion site to the gabion;
- 2) zone 2 - movement of the fragment inside the gabion with sand;
- 3) zone 3 - movement of the fragment from the gabion to the object (if the fragment passes zone 2).

We will describe the dynamics of the fragment movement in each zone using Newton's second law:

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

where  $m$  is the mass of the fragment;  $V(u, v)$  is the velocity vector of the fragment in the medium;

$F_g = mg$  is the gravity;  $F_R = C_x \frac{\rho_6 V^2}{2} S$  – the drag force of the fragment;  $C_x$  – the drag coefficient of

the fragment;  $\rho_6$  – the density of the medium;  $S$  – the copper cross-sectional area of the fragment;  $t$  – time.

It should be noted that the value of the drag coefficient  $C_x$  for the second zone (movement of the fragment in the sand) differs from the value of this coefficient for the first and third zones (movement of the fragment in the air).

For practical use of equation (1), let's write it in the projection on the coordinate axis for each zone:

$$m \frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_6 u^2}{2} S, \quad (2)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_6 v^2}{2} S - mg, \quad (3)$$

where  $u, v$  are the projections of the fragment velocity vector on the coordinate axes;  $S$  is the area of the midline section.

Note that the Y-axis is directed vertically upward, and the X-axis is directed in the direction of horizontal movement of the fragment.

Next, the numerical integration of equations (2) and (3) is performed to determine the speed of the fragment in each zone. The drag coefficient  $C_x$  for the first and third zones is assumed to be 0.5, for the second zone it is assumed to be 0.85 (Gerasimov S.I., Erofeev V.I. and others).

The mathematical model uses the value of the cross-sectional area  $S$  to calculate the drag force, so the value of the parameter  $S$  is determined as follows. If the mass of the fragment is  $m$ , then this mass can be determined as follows

$$m = \rho_s W,$$

$\rho_s$  – the density of the fragment material;  $W$  – the volume of the fragment.

The volume of the fragment can be determined experimentally, for example, using Archimedes' law - that is, by measuring the volume of water that was displaced from the container in which the fragment was placed. Thus, the parameter  $W$  can be taken known. However, if the model represents the shape of the fragment as a cone, then the parameter  $W$  is calculated as follows:

$$W = \frac{1}{3} \pi R^2 h,$$

where  $R$  – radius of the base of the cone;  $h$  – height of the cone.

The parameter  $h$  can be assumed to be known based on the analysis of the shape of the fragment. Then, the radius of the base of the cone will be determined based on the following dependencies as follows

$$R = \sqrt{\frac{3m}{\rho\pi h}}.$$

The value of the area of the copper section will be  $S = 0.785(2R)^2$ .

### Numerical solution

Equations (2), (3) for each zone are solved numerically using the Euler method [7]. The determination of the values of the components of the velocity of the fragment  $u, v$  on the new time layer « $n+1$ » is based on the following dependencies:

$$u^{n+1} = u^n - \Delta t \cdot C_x \frac{\rho_a u^2}{2m} S, \quad (4)$$

$$v^{n+1} = v^n - \Delta t \cdot C_x \frac{\rho_a v^2}{2m} S - \Delta t g. \quad (5)$$

To perform the calculation based on dependencies (4) and (5), it is necessary to set the angle  $\alpha$  of the fragment departure, which makes it possible to determine the projections of the fragment velocity vector at the beginning of the calculation

The range  $\Delta x$  of the fragment for the time step  $\Delta t$  is equal to:

$$\Delta x = \Delta t \cdot u(t).$$

The distance of the fragment from the explosion site is determined as follows:

$$x(t) = x_0 + \sum \Delta x,$$

where  $x_0$  is the coordinate of the fragment departure location.

The numerical model was programmed and the code «Drone-2» was created. The programming language is FORTRAN. The code provides information about the speed of the fragment in different parts of each zone. It should be borne in mind that this speed value allows us to determine the kinetic energy of the fragment in each zone. Particular at-

tention should be paid to the value of the out-of-obstacle velocity of the fragment, i.e., the velocity of the fragment after passing the gabion «body», since the main purpose of using gabion is to significantly reduce the velocity of the fragment, which makes it possible to reduce its kinetic energy.

At the second stage of this research area, a numerical model was developed to assess the thermal damage zones at an industrial site in the event of an oil storage facility fire. To model the heating of air at an industrial site, the energy equation was used:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{ grad } T), \quad (6)$$

where  $T$  – temperature;  $u, v$  – components of the air flow vector;  $a = (a_x, a_y)$  – thermal conductivity coefficients;  $x_i, y_i$  – Cartesian coordinates;  $t$  – time.

The boundary conditions for the energy equation are as follows:

1. At the boundary where the air flow enters the area:

$$T = T_{in},$$

where  $T_{in}$  – the background air temperature.

2. At the boundary where the air flow leaves the calculation zone:

$$T_{i+1,j} = T_{i,j},$$

where  $T_{i+1,j}$  – temperature in the last difference cell;  $T_{i,j}$  – temperature in the previous cell.

3. On the surface of objects, ground surface, upper boundary of the calculation area:

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

Initial condition ( $t=0$ ):  $T=T_0$ , where  $T_0$  – air temperature where the fire occurs, in the rest of the computational domain the temperature is equal to the background temperature

Since there are several storage facilities on an industrial site, it is necessary to take into account the influence of these facilities on the airflow velocity field. To solve this problem, we will use the following equation:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (7)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (8)$$

where  $P$  – velocity potential.

The boundary conditions for the aerodynamic equation are:

$$1) \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \text{ – on hard borders;}$$

$$2) \frac{\partial P}{\partial n} = V_n \text{ – at the boundary where the flow enters region, } V_n \text{ – known air velocity;}$$

3)  $P = \text{const}$  – at the boundary where the flow exits region.

On the basis of equation (7) and dependencies (8), the deformation of the air flow velocity field in the presence of objects at an industrial site is determined

For the numerical integration of equations (6) and (7), finite-difference splitting schemes are used. The code for the implementation of the numerical model on a computer has been developed, the programming language is FORTRAN.

### Findings

At the first stage of calculations, parametric studies were conducted to determine the effectiveness of using gabion with sand to protect the tank building from the effects of fragment (Fig. 1). As a first approximation, we considered the case when the fragment after the explosion moves horizontally in the direction of the object ( $\alpha=0$ ).

The calculation is based on the following data: the explosion occurs at a distance of 40 meters from the oil storage facility, the protective barrier is located at a distance of 15 meters from the oil storage facility. The height of the fragment ejection is 3 m, the mass of the fragment is 50 grams. Two scenarios were considered. The first scenario:  $\rho=1\ 600\ \text{kg/m}^3$  – sand density in gabion (dry sand); the initial velocity of the fragment varies: 300 m/s; 450 m/s; 600 m/s. The density of the fragment material is  $7\ 700\ \text{kg/m}^3$ , the diameter of the base of the fragment «cone» is 2 cm. It is assumed that the protective function of the gabion is fulfilled if the speed of the  $V_b$  obstructing the fragment (i.e., the speed behind the gabion) is about 0.2 m/s, i.e., at this speed the kinetic energy of the fragment is not sufficient to damage the surface of the oil storage facility. The task is to determine the required width of the gabion.

The calculation results for these parameters are shown in Table 1.

Table 1

**Values of the out-of-bounds velocity of the fragment (Scenario 1)**

Initial velocity of the fragment	Out-of-bounds speed $V_b$	Gabion thickness
300 m/s	0.15 m/s	1.86 m
450 m/s	0.16 m/s	1.95 m
600 m/s	0.16 m/s	2.01 m

According to the results shown in Table 1, it can be argued that with a gabion thickness of about 2 m, for the given parameters of the problem, the gabion will be effective.

Second scenario: initial fragment velocity 700 m/s; sand density in the gabion varies:  $\rho=1\ 600\ \text{kg/m}^3$  (dry sand);  $\rho=1\ 920\ \text{kg/m}^3$  (wet sand);  $\rho=2\ 080\ \text{kg/m}^3$  (wet, compressed sand).

The calculation results for the second scenario are shown in Table 2.

Table 2

**Values of the out-of-bounds velocity of the fragment (Scenario 2)**

Type of sand in gabion	Out-of-bounds speed $V_b$	Gabion thickness
dry sand	0.16 m/s	2.03 m
wet sand	0.14 m/s	1.72 m
wet, compacted sand	0.14 m/s	1.58 m

According to the results shown in Table 2, it can be argued that when wet, compressed sand is used in the gabion body, its thickness can be reduced by about 20 %.

Note that the calculation time is 1 second.

The following are the results of a computational experiment to calculate the area of thermal pollution at an industrial site (model problem) when the oil storage facility is damaged by fragment and a burning spill zone appears. The temperature at the fire site is 1 300 °C. The effect of a protective screen (gabion) at an industrial site on reducing the air temperature near the wall of a tank with oil products located near the burning area is analyzed.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

The simulation was performed at a wind speed of 7 m/s and an initial air temperature of 20 °C. Three scenarios were considered:

Scenario №1 – no protective screen (gabion) near the spill area;

Scenario №2 – with protective screen (gabion), height 4 m;

Scenario №3 – with protective screen (gabion), height 8 m.

The temperature field at the industrial site for each scenario is shown in Figs. 4–6.

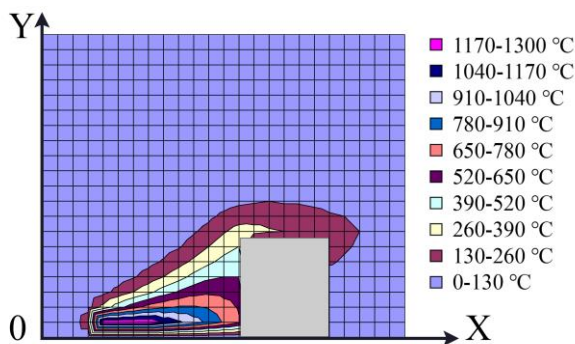


Fig. 4. Heat contamination zone (Scenario №1)

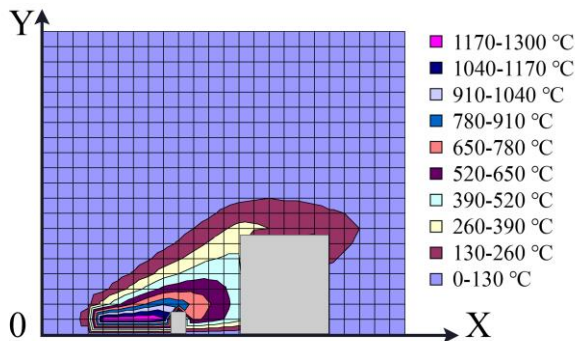


Fig. 5. Heat contamination zone (Scenario №2)

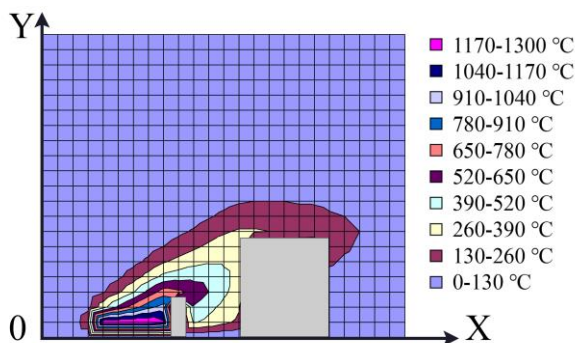


Fig. 6. Heat contamination zone (Scenario №3)

From the above figures, it can be seen that the air temperature on the windward wall of the storage facility, in the absence of a screen, varies from 663 °C (in the lower part) to 390 °C (in the upper part). In the presence of a 4 m high shield, the temperature varies from 442 °C (in the lower part) to 364 °C (in the upper part). In the presence of a screen that has a height of 8 m, the temperature varies from 234 °C (in the lower part) to 325 °C (in the upper part). Thus, the screen effectively reduces the temperature in the lower part of the repository wall under the considered scenarios.

Note that the calculation time for each scenario is 3 seconds.

### Originality and Practical value

An effective mathematical model has been developed to evaluate the effectiveness of using gabion to protect the oil storage facility from damage by drone fragment. The constructed mathematical model is based on the numerical integration of the equation of unsteady motion of a material point in airspace and in the body of the gabion to determine the obstructive speed of the fragment.

The proposed model makes it possible to determine the rational dimensions of the gabion to reduce the risk of damage to the tank wall.

An effective computer model of thermal air pollution at an industrial site in the event of a fire at an oil storage facility is presented. The model makes it possible to carry out an express assessment of the risk of thermal damage to humans at an industrial site in the event of a fire.

### Conclusions

1. A multivariate mathematical model of the fragment movement in the air and in the gabion «body» with different contents was created.

2. On the basis of the constructed mathematical model, a computer code was created to conduct a computational experiment to determine the effectiveness of the use of protective barriers (gabions) on the territory of an industrial site. This code can be useful at the «form sketch» stage of the

3. A computational experiment was carried out, which made it possible to determine the rational thickness of the gabion for filling which sand was used.

4. The risk of thermal damage to humans at an industrial site in the event of an oil storage facility fire was assessed.

5. The considered numerical models belong to the class of «screening models» used for engineering estimates.

#### 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*. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Полторацька В. М. Використання габіонів для захисту від ураження нафтопродуктами. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/305713>
3. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Тимошенко О. А. Зниження ризику ураження у випадку металевих уламків. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1 (019). С. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270224.56.1023>
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
5. Adilov F., Abirov R. On numerical investigation of stability of roadbeds reinforced by gabion structures. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 264. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402004>
6. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. 2011. P. 87–91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
7. Example of Gabion Calculation in FLAC3D 7.00. *ITASCA*. URL: <https://itasca.frb.io/software/support/examples/example-of-gabion-calculation-in-flac3d-7-00>
8. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON*. 2018. Vol. 16, No. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
9. Lin D.-G., Huang B.-S., Lin S.-H. Deformation analyses of gabion structures. *Engineering*. 2010. P. 1–15.
10. Lin Y.-L., Fang P.-F., Wang X., Wu J., Yang G.-L. Experimental and Numerical Study on Tensile Behavior of Double-Twisted Hexagonal Gabion Wire Mesh. *Buildings*. 2023. Vol. 13. Iss. 7. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071657>
11. Shariq A., Hussain A., Ahmad Z. Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020. Vol. 74. P. 101769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101769>

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

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

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

<sup>3</sup>Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта [uzpr38@ukr.net](mailto:uzpr38@ukr.net), ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>4\*</sup>Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>5</sup>Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

## Оцінювання ефективності використання габіонів для захисту від ураження промислових об'єктів

**Мета.** У разі екстремальних ситуацій на промислових майданчиках можлива поява різних уражальних факторів, наприклад, поширення в повітрі токсичних речовин, створення вогняної кулі тощо, які становлять загрозу життю працівників та мають значний негативний вплив на довкілля. Тому сьогодні особливу увагу привертають задачі, пов'язані з розлітанням уламків під час атаки дронів. На промисловому майданчику, де розташовані сховища нафтопродуктів, уламки, що утворилися під час вибуху, можуть пошкодити корпус нафтосховища та спричинити пожежу. У зв'язку з цим основна мета роботи полягає в оцінюванні ефективності використання габіону для зниження ризику ураження нафтосховища під час руху уламків дрона. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто задачу розлітання уламків у разі вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані нафтосховища. Для захисту корпусу нафтосховища від металевих уламків запропоновано використання габіону з піском. Передбачено розробити математичну модель руху уламка, на шляху якого розташований габйон. Також розглянуто вплив габіону як захисного екрана на зниження температури повітря біля сусіднього сховища нафтопродуктів у разі виникнення пожежі на промисловому майданчику. Для математичного опису руху уламка використано модель динаміки руху точки (другий закон Ньютона). Чисельне інтегрування моделювальних рівнянь здійснено за методом Ейлера. Для моделювання процесу термічного забруднення повітря на промисловому майданчику під час пожежі використано рівняння енергії. **Результати.** У роботі здійснено програмування чисельної моделі та створено комп'ютерний код. Мова програмування – FORTRAN. Код дає інформацію про швидкість руху уламка в різних частинах кожної зони. На базі побудованої чисельної моделі та створеного коду було проведено параметричні дослідження з визначення ефективності використання габіону з піском для захисту корпусу нафтосховища від дії уламків. Як наближення розглянуто випадок, коли уламок після вибуху рухається горизонтально в напрямку об'єкта. Здійснено аналіз впливу висоти габіону на рівень нагрівання стінки сховища нафтопродуктів, розташованого на промисловому майданчику. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну математичну модель оцінювання ефективності використання габіону для захисту корпусу нафтосховища від ураження уламками дрона. Запропонована модель дозволяє визначати раціональні розміри габіону для зниження ризику пошкодження стінки нафтосховища. Наведено ефективну комп'ютерну модель термічного забруднення повітря на промисловому майданчику у випадку пожежі на нафтосховищі. **Практична значимість.** На базі побудованої математичної моделі створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту з метою визначення ефективності використання захисних перешкод (габйонів) на території промислового майданчика.

*Ключові слова:* ризик ураження; динаміка руху уламка; габйон; математичне моделювання; термічне забруднення

### REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannya v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochikh mistsiakh*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Biliaiev, M. M., Kalashnikov, I. V., Berlov, O. V., Kozachyna, V. A., & Poltoratska, V. M. (2024). Using Gabions to Protect Oil Storage Facilities from Damage. *Science and Transport Progress*, 2(106), 12-17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/305713> (in Ukrainian)
3. Biliaiev, M. M., Kalashnikov, I. V., Berlov, O. V., Kozachyna, V. A., & Tymoshenko, O. A. (2024). Reduction of the risk of damage at projectile debris projectile effect. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(019), 56-61. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270224.56.1023> (in Ukrainian)
4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovani-erasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Adilov, F., & Abirov, R. (2021). On numerical investigation of stability of roadbeds reinforced by gabion structures. *E3S Web of Conferences*, 264, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402004> (in English)
6. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and Its Application XXI*, 87-91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15) (in English)
7. Example of Gabion Calculation in FLAC3D 7.00. *ITASCA*. Retrieved from <https://itasca.frb.io/software/support/examples/example-of-gabion-calculation-in-flac3d-7-00> (in English)

8. Plić, P., Plić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON*, 16(1-2), 38-45.  
DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in Serbian)
9. Lin, D.-G., Huang, B.-S., & Lin, S.-H. (2010). Deformation analyses of gabion structures. *Engineering*, 1-15. (in English)
10. Lin, Y.-L., Fang, P.-F., Wang, X., Wu, J., & Yang, G.-L. (2023). Experimental and Numerical Study on Tensile Behavior of Double-Twisted Hexagonal Gabion Wire Mesh. *Buildings*, 13(7), 1-16.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071657> (in English)
11. Shariq, A., Hussain, A., & Ahmad, Z. (2020). Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74, 101769.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101769> (in English)

Надійшла до редколегії: 15.11.2024

Прийнята до друку: 19.03.2025

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.383.51-047.37

О. Б. ГНИЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ПЛАКСІН<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49045, тел. +380 (056) 373 12 63, ел. пошта gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

<sup>2</sup>Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук 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 впливу графенових контактів на ефективність фотоелектричного перетворення в багатоперехідному сонячному елементі з вертикальними р–п переходами

**Мета.** Це дослідження спрямовано на вдосконалення конструкції багатоперехідного сонячного елемента з вертикально розташованими р–п переходами для підвищення ефективності фотоелектричного перетворення в разі похилого падіння сонячних променів. **Методика.** Для досягнення мети запропоновано як контакти між послідовно з'єднаними елементарними р–і–п комірками багатоперехідного сонячного елемента використовувати прозорі графенові шари замість металізації бічних поверхонь комірок алюмінієм. Побудовано модель досліджуваного сонячного елемента за допомогою програмного пакета Silvaco TCAD і проведено серію комп'ютерних експериментів для отримання основних електричних характеристик та аналізу їх залежності від параметрів сонячного елемента. Математична модель, використана в Silvaco TCAD для моделювання напівпровідникових пристроїв, передбачає розв'язання фундаментальних рівнянь Пуассона, неперервності та транспортних рівнянь на основі дифузійно-дрейфової моделі переносу. **Результати.** У ході проведеного комп'ютерного моделювання автори довели, що використання графенових контактів між елементарними р–і–п комірками багатоперехідного сонячного елемента замість традиційної металізації алюмінієм дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт корисної дії в разі похилого падіння сонячних променів. Так, заміна металевих контактів графеновими дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії сонячного елемента на 15 % у випадку падіння сонячного випромінювання під кутом 45°. **Наукова новизна.** Автори вперше запропонували конструкцію та провели комп'ютерне моделювання багатоперехідного сонячного елемента з вертикально розташованими р–п переходами, у якому звичайні металеві контакти між послідовно з'єднаними елементарними сонячними комірками замінені прозорими шарами графену. **Практична значимість.** Результати моделювання підтверджують можливість використання запропонованої конструкції сонячного елемента в умовах похилого падіння сонячних променів. Такі властивості сонячного елемента дозволяють його застосовувати на вертикальних, похилих або рухомих поверхнях, у тому числі на об'єктах рухомого складу та транспортної інфраструктури, де практично неможливо забезпечити оптимальний кут падіння сонячного випромінювання.

**Ключові слова:** багатоперехідний сонячний елемент; графеновий контакт; вертикальний р–п перехід; дифузійно-дрейфова модель; вольт-амперна характеристика; коефіцієнт корисної дії

### Вступ

Одним із перспективних, але недостатньо розвинутих напрямів сучасної фотовольтаїки є розробка сонячних елементів, у яких р–п переходи розташовані не горизонтально, за стан-

дартною планарною конструкцією, а вертикально. У таких фотоелектричних перетворювачах сонячне випромінювання розповсюджується вздовж переходів, а не спрямоване по нормалі до переходів, як у стандартних планарних

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

сонячних елементах [2]. Поперечний розмір таких сонячних елементів обумовлений довжиною пробігу носіїв заряду, тому елементарні сонячні комірки, які є напівпровідниковими  $p-i-n$  структурами з одним вертикальним  $p-n$  переходом, з'єднують послідовно. Таким чином отримують багатоперехідні сонячні елементи з вертикальними  $p-n$  переходами в елементарних сонячних комірках [1].

Необхідно відзначити, що очевидною перевагою вертикального розташування  $p-n$  переходів є те, що носії заряду та фотони рухаються не вздовж одного напрямку, а у взаємно ортогональних напрямках. Таке розділення напрямків руху для носіїв заряду і фотонів надає можливість поліпшити умови збирання носіїв заряду і водночас забезпечити оптимальні умови для поглинання сонячного випромінювання. Таким чином, з'являється додатковий ступінь варіативності для оптимізації структури сонячного елемента та підвищення в результаті його коефіцієнта корисної дії. Іншою важливою перевагою багатоперехідних сонячних елементів з вертикальними  $p-n$  переходами є те, що на фронтальній поверхні сонячного елемента відсутня контактна сітка, яка затінює сонячні промені. Такі сонячні елементи демонструють кращу термальну стійкість та спектральну чутливість. Оскільки в багато-перехідному сонячному елементі елементарні комірки з'єднані послідовно, з'являється можливість досягати високих рівнів напруги. Крім того, велика площа контакту між елементарними сонячними комірками дозволяє суттєво знизити послідовний опір. Найвищу ефективність такі сонячні елементи демонструють у випадку використання разом із концентраторами сонячного випромінювання [7].

Завдяки можливості використання під час створення фотоелектричних перетворювачів із вертикальним розташуванням  $p-n$  переходів простих і добре відпрацьованих технологічних методів та операцій існують конкретні технічні рішення щодо таких багатоперехідних фотоелектричних перетворювачів. Так, наприклад, у [8, 9] було запропоновано для кількох десятків кремнієвих пластин стандартного розміру, діаметр яких складає чотири дюйми, а товщина 250 мікрон, методом дифузії або імплантування створити  $p^+-n-n^+$  структури та металізувати їх з

обох сторін. Далі такі  $p^+-n-n^+$  структури складають одна до одної і сплавляють під тиском та високою температурою до отримання єдиної монолітної багат шарової структури з висотою 1 см. Цю багат шарову структуру розрізають у напрямку, ортогональному до  $p-n$  переходів, завдяки чому отримують пластини розміром  $1 \times 1$  см, товщина яких дорівнює 0,05 см. Такі пластини є набором послідовно з'єднаних елементарних сонячних комірок, кожна з яких являє собою напівпровідникову  $p^+-n-n^+$  структуру. Фронтальну і тильну сторони відшліфують для усунення дефектів, що з'являються після різання, та покривають пасивувальними шарами. На фронтальній стороні створюють невідбивне покриття, а на торцевих поверхнях  $p^+-n-n^+$  структури утворюють зовнішні металеві контакти. У такому фотоелектричному перетворювачі сонячне випромінювання поширюється вздовж  $p-n$  переходів, причому інтенсивність випромінювання може бути збільшена концентраторними системами.

Недоліком стандартної конструкції багато-перехідного сонячного елемента з вертикальним розташуванням  $p-n$  переходів є те, що для формування внутрішніх контактів між елементарними сонячними комірками використовують металізацію бічних поверхонь  $p^+-n-n^+$  структур алюмінієм. У результаті між елементарними сонячними комірками формується вертикальна непрозора для сонячних променів решітка з алюмінієвих шарів. Таким чином, ефективність фотоелектричного перетворення значно залежить від того, під яким кутом сонячні промені падають на фронтальну поверхню сонячного елемента. Максимального значення коефіцієнта корисної дії можливо досягти тільки в разі падіння сонячних променів на освітлювану поверхню під прямим кутом. У випадку відхилення кута падіння сонячних променів від прямого ефективність фотоелектричного перетворення швидко зменшується через затінення  $p^+-n-n^+$  структур вертикальною решіткою з металевих контактів між елементарними сонячними комірками. Такий недолік можна частково усунути використанням механічних трекерних або спрямовувальних оптичних систем для забезпечення оптимального кута падіння сонячних променів на фотоелектричний перетворювач. Але слід зауважити, що використання подібних

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

пристроїв значно звужує сферу застосування багато-перехідних сонячних елементів із вертикальними р–n переходами. Особливо це відчутно в транспортній галузі, де в разі покриття сонячними модулями елементів рухомого складу або транспортної інфраструктури неможливо забезпечити належні умови освітлення [4].

**Мета**

У дослідженні, результати якого представлені в цій статті, поставлено задачу поліпшити характеристики багатоперехідного сонячного елемента з вертикальними р–n переходами для умов похилого падіння сонячного випромінювання.

Для розв'язання вказаної задачі запропоновано замінити традиційну для багатоперехідних сонячних елементів із вертикальними р–n переходами металізацію алюмінієм бічних поверхонь послідовно з'єднаних р<sup>+</sup>–n–n<sup>+</sup> структур прозорими надтонкими шарами графену – матеріалу, який завдяки своїм унікальним характеристикам електропровідності, прозорості, міцності, гнучкості тощо є найкращим засобом для створення прозорих електричних контактів сонячних елементів у фотовольтаїці.

**Методика**

Досліджуваний сонячний елемент, зображений на рис. 1 [6], сформований кількома десятками послідовно з'єднаних елементарних сонячних комірок, розташованих у горизонтальній площині, кожна з яких являє собою дифузійну р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> кремнієву структуру з вертикальним р–n переходом. Сусідні р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> структури розділені тонкими графеновими шарами, завдяки яким забезпечується послідовне електричне з'єднання всіх елементарних сонячних комірок у суцільний модуль. На бічних поверхнях крайніх р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> структур утворені прозорі електричні контакти з оксиду індію-олова для подальшого з'єднання сонячних модулів у більший сонячний елемент. Кількість р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> структур у сонячному модулі обирають залежно від необхідного користувачу рівня напруги. Сонячні модулі надалі з'єднують паралельно звичайними електричними контактами для досягнення потрібних користувачу значень електричного струму. За результатами проведеного

комп'ютерного моделювання засобами Silvaco TCAD визначено, що оптимальна товщина шару кремнію елементарної р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> структури за умови часу життя неосновних носіїв заряду 1 нс становить 200 мкм, а товщини дифузійних високолегованих шарів р<sup>+</sup>- та n<sup>+</sup>-типу дорівнюють 1,5 мкм [6]. Оптимальна висота такої р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> структури дорівнює 500 мкм, що забезпечує достатній рівень поглинання фотонів. Концентрація легувальних домішок у дифузійних шарах р– та n–типу становить 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, а в поглинальному базовому шарі кремнію р–типу – 10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>. Товщина графенових контактів дорівнює 10 нм. Сонячний модуль, сформований із 50 р<sup>+</sup>–р–n<sup>+</sup> структур, має загальний розмір 1x1 см. На фронтальну і тильну сторони сонячного модуля нанесене пасивувальне покриття з SiO<sub>2</sub>, товщина якого дорівнює 100 нм. Тильна сторона сонячного модуля додатково металізована алюмінієм для створення відбивного покриття, а на фронтальній стороні сформовано невідбивне покриття.

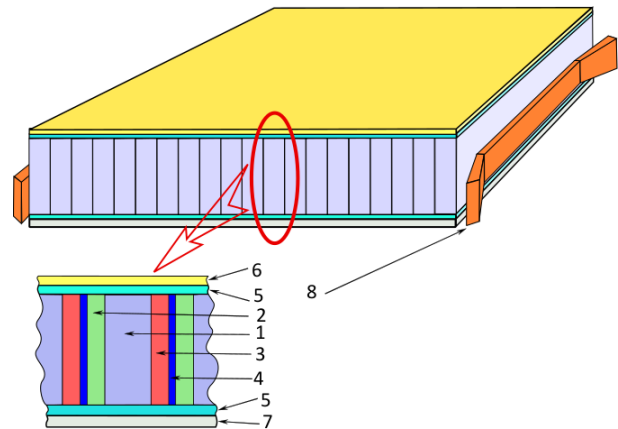


Рис. 1. Конструкція сонячного елемента:

- 1 – базовий слаболегований кремнієвий шар р–типу провідності;
- 2 – дифузійний сильнолегований шар кремнію р–типу;
- 3 – дифузійний сильнолегований шар кремнію n–типу;
- 4 – графеновий шар внутрішнього контакту;
- 5 – пасивувальний шар; 6 – невідбивне покриття;
- 7 – відбивне покриття з алюмінію; 8 – зовнішній контакт з оксиду індію-олова [6]

Fig. 1. Construction of a solar cell:

- 1 – basic low-alloyed silicon layer of p-type conductivity;
- 2 – diffusion high-alloyed silicon layer of p-type;
- 3 – diffusion high-alloyed silicon layer of n-type;
- 4 – graphene layer of the internal contact;
- 5 – passivation layer; 6 – non-reflective coating;
- 7 – reflective coating of aluminum; 8 – external contact of indium-tin oxide [6].

## Результати

Для перевірки особливостей функціонування запропонованого багато-перехідного сонячного елемента та одержання його електричних характеристик було проведено моделювання вищевказаного сонячного модуля в програмному пакеті Silvaco TCAD. Комп'ютерний розрахунок виконано за дифузійно-дрейфовою моделю переносу, яка передбачає сумісне розв'язання рівняння Пуассона та рівнянь неперервності для електронів та дірок із врахуванням відповідних механізмів рекомбінації, моделей рухливості носіїв заряду, оптичних властивостей матеріалів тощо. Розрахунок сонячного модуля проведено за умов послідовного з'єднання до п'яти  $p^+ - n - n^+$  структур, які є елементарними сонячними комітками. Рис. 2 демонструє вольт-амперну характеристику сонячного модуля з різною кількістю елементарних сонячних коміток за умов нормального падіння сонячних променів інтенсивністю в 1 сонце в разі AM1,5. Для сонячного модуля, що складається з 50 послідовно з'єднаних сонячних коміток розміром 1x1 см, отримано напругу холостого ходу 38 В та коефіцієнт корисної дії 19,5 % за нормального падіння сонячних променів [6].

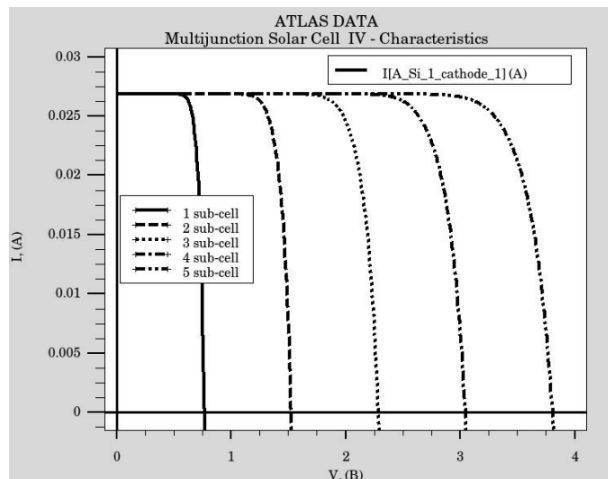


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика багатоперехідного сонячного елемента з різною кількістю послідовно з'єднаних  $p^+ - n - n^+$  структур

Fig. 2. Current-voltage characteristic of a multi-junction solar cell with a different number of series-connected  $p^+ - n - n^+$  structures connected in series

На рис. 3 зображена залежність коефіцієнта корисної дії сонячного модуля, який складається з п'яти послідовно з'єднаних елементарних сонячних коміток, від кута падіння сонячних променів на фронтальну поверхню для прозорих графенових та відбивних алюмінієвих контактів. Слід зауважити, що товщина алюмінієвих контактів обрана в розрахунках такою, що дорівнює 10 нм, щоб зменшити різницю в умовах освітлення за умови порівняння з надтонкими графеновими контактами. Реальна ж товщина алюмінієвих контактів на практиці не менша ніж 1 мкм, що підсилює втрати від затінення фотоактивних шарів.

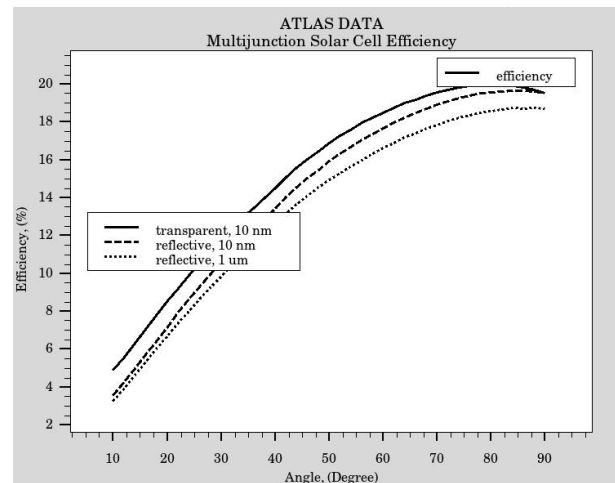


Рис. 3. Залежність ККД сонячного елемента від кута падіння сонячного випромінювання

Fig. 3. Dependence of solar cell efficiency on the angle of incidence of solar radiation

Можна побачити, що використання прозорих графенових контактів між елементарними  $p^+ - n - n^+$  структурами багатоперехідного сонячного елемента з вертикальними  $p - n$  переходами дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії на 15 % в разі падіння сонячного випромінювання під кутом  $45^\circ$ .

## Наукова новизна та практична значимість

Автори роботи на основі побудови комп'ютерної моделі та проведення серії комп'ютерних експериментів уперше дослідили можливість підвищення коефіцієнта корисної дії багатоперехідного сонячного елемента з вертикальними  $p - n$  переходами за рахунок

використання як контактів між елементарними  $p^+ - n - n^+$  комірками прозорих шарів графену. Показано, що заміна традиційних алюмінієвих контактів прозорими графеновими дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт корисної дії сонячного елемента в разі похилого падіння сонячного випромінювання. Ця властивість дає можливість використовувати сонячний елемент на вертикальних або похилих поверхнях, де важко забезпечити оптимальний кут падіння сонячного випромінювання без застосування механічних трекерних або оптичних спрямовувальних систем. Особливо це стосується рухомих об'єктів, де застосування подібних систем неможливе. Тому сферою використання запропонованого фотоелектричного перетворювача може бути транспортна галузь, де розглянута конструкція сонячного елемента виявиться корисною для енергозабезпечення рухомого складу та транспортної інфраструктури [3, 5].

### Висновки

У статті представлено результати комп'ютерного моделювання багато-перехідного сонячного елемента з вертикальним розташуванням  $p - n$  переходів, у якому традиційні металеві контакти між елементарними сонячними комірками замінено контактами з прозорих шарів графену.

Продемонстровано переваги досліджуваного фотоелектричного перетворювача, який забезпечує більші значення коефіцієнта корисної дії в разі похилого падіння сонячного випромінювання порівняно з подібною структурою з алюмінієвими контактами між сонячними комірками. Так, наприклад, за падіння сонячних променів на сонячний елемент під кутом  $45^\circ$  коефіцієнт корисної дії збільшується на 15 %, що дозволяє використати розглянутий сонячний елемент на вертикальних, похилих або рухомих поверхнях, на яких неможливо забезпечити випромінювання під оптимальним кутом.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гниленко А. Б., Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Погорелая Л. М. Влияние толщины кремниевых пластин на характеристики многопереходных солнечных элементов с вертикальными  $p - n$  переходами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012. № 1. С. 27–29.
2. Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Дзензерский В. А. Моделирование кремниевого солнечного элемента с вертикальным  $p - n$  переходом. *Відновлювана енергетика*. 2013. № 2. С. 37–44.
3. Голота О. О., Муха А. М., Устименко Д. В., Плаксин С. В. Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301521>
4. 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>
5. 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>
6. Плаксин С. В., Гниленко О. Б., Скосар В. Ю. *Багатоперехідний сонячний елемент з вертикальними  $p - n$  переходами та графеновими контактами* : патент на корисну модель UA 116998 U. 29.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11. 6 с.
7. Abushattal A. A., Loureiro A. G., Boukourt N. E. I. Ultra-high concentration vertical homo-multijunction solar cells for CubeSats and terrestrial applications. *Micromachines*. 2024. No. 15 (2). P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15020204>
8. Sater B. L. *High intensity solar cell* : pat. USA № 4,409,422. 1983. 11 p.
9. WO2014134159. *Vertical multi-junction photovoltaic cell with reverse current limiting element*. IPC H01L 31/0725. Published 04.09.2014. 20 p.

A. B. GNILENKO<sup>1\*</sup>, S. V. PLAKSIN<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Electronic Computing Machinery, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Ave., 72, Dnipro, Ukraine, 49045, tel. +380 (056) 373 12 63, e-mail gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

<sup>2</sup>Dep. of Vehicle Control Systems, Institute of Transport Systems and Technology National Academy of Science of Ukraine, Pysarzhevskogo St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

## Study of the Influence of Graphene Contacts on the Efficiency of Photovoltaic Conversion in a Multi-junction Solar Cell with Vertical p–n Junctions

**Purpose.** The research is aimed at improving the design of a multi-junction solar cell with vertically arranged p–n junctions. The purpose of the study is to increase the efficiency of photovoltaic conversion under oblique incidence of sunlight. **Methodology.** To achieve the goal of the research, it is proposed to use transparent graphene layers as contacts between the series-connected elementary p–i–n cells of a multi-junction solar cell instead of metallizing the side surfaces of the cells with aluminum. A model of the studied solar cell was built using the Silvaco TCAD software package, and a series of computer experiments were conducted to obtain the main electrical characteristics and analyze their dependence on the parameters of the solar cell. The mathematical model used in Silvaco TCAD for modeling semiconductor devices involves solving the fundamental Poisson equations, continuity, and transport equations based on the diffusion-drift transport model. **Findings.** Based on the computer modeling, the authors proved that the use of graphene contacts between the elementary p–i–n cells of a multi-junction solar cell instead of traditional aluminum metallization allows to significantly increase the solar cell efficiency under oblique incidence of sunlight. Thus, replacing metal contacts with graphene ones allows to increase the efficiency coefficient of the solar cell by 15% at an angle of 45° of solar radiation incidence. **Originality.** The authors first proposed the design and conducted computer simulation of a multi-junction solar cell with vertically arranged p–n junctions in which the usual metal contacts between the series-connected elementary solar cells are replaced by transparent layers of graphene. **Practical value.** The simulation results confirm the possibility of using the proposed solar cell design in conditions of oblique incidence of sunlight. Such properties of the solar cell allow its use on vertical, inclined or moving surfaces, including vehicles and transport infrastructure, where it is practically impossible to ensure the optimal angle of incidence of solar radiation.

**Keywords:** multi-junction solar cell; graphene contact; vertical p–n junction; diffusion-drift model; volt-ampere characteristic; efficiency; volt-ampere characteristic

### REFERENCES

1. Gnilenko, A. B., Dzenzersky, V. A., Plaksin, S. V., & Pogorelaya, L. M. (2012). The influence of silicon wafer thickness on characteristics of multijunction solar cells with vertical p–n-junctions. *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 1, 27-29. (in Russian)
2. Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Dzenzerskiy, V. A. (2013). Modelirovaniye kremnievogo solnechnogo elementa s vertikalnym p–n perekhodom. *Vidnovlyuvana energetika*, 2, 37-44. (in Russian)
3. Holota, O. O., Mukha, A. M., Ustylenko, D. V., & Plaksin, S. V. (2024). Investigation of Processes in the Traction Capacitor Circuit of the Model of High-Speed Magnetolevitation Transport. *Science and Transport Progress*, 1(105), 30-41. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301521> (in Ukrainian)
4. 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 Ukrainian)
5. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustylenko, 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)
6. Plaksin, S. V., Hnylenko, O. B., & Skosar, V. Yu. (2017). *Multijunction solar cell with vertical p–n junctions and graphene contacts* (Utility model patent No. UA 116998 U). Ukrainian Intellectual Property Institute. (in Ukrainian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

---

7. Abushattal, A. A., Loureiro, A. G., & Boukortt, N. E. I. (2024). Ultra-High Concentration Vertical Homo-Multijunction Solar Cells for CubeSats and Terrestrial Applications. *Micromachines*, 15(2), 1-18.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15020204> (in English)
8. Sater, B. L. (1983). *High intensity solar cell* (U.S. Patent No. 4,409,422). U.S. Patent and Trademark Office.
9. *WO2014134159. Vertical multi-junction photovoltaic cell with reverse current limiting element (PCT Patent No. WO2014134159)*. (2014). World Intellectual Property Organization. (in English)

Надійшла до редколегії: 29.11.2024

Прийнята до друку: 28.03.2025

# ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.2.027:004.9-047.37

М. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, Д. М. КУРГАН<sup>2</sup>, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА<sup>3</sup>, Д. Л. КОВАЛЬСЬКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта d.m.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9448-5269

<sup>3</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта n.p.hmelevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2360-8671

<sup>4</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

## Перспективи впровадження високошвидкісного руху на залізницях України

**Мета.** ЄС має амбітну мету – суттєво розширити мережі високошвидкісних залізничних ліній. Наразі Україна не має прямого досвіду будівництва високошвидкісних залізниць порівняно з європейськими проектами. Незважаючи на його відсутність, Україна має стратегію розвитку високошвидкісного залізничного сполучення. Дослідження спрямовано на аналіз та обґрунтування умов, за якими будівництво магістралі Київ – Львів – Варшава може стати економічно доцільним проектом, який принесе значні економічні, соціальні та екологічні вигоди. **Методика.** Для оцінки ефективності будівництва високошвидкісної магістралі на новій трасі автори застосували модель прогнозування й оцінки ефективності здійснення залізничних перевезень з урахуванням усіх витрат за показником NPV (Net Present Value of Discounted Cash Flow). NPV служить потужним інструментом для оцінки інвестиційних проектів, що дозволяє приймати обґрунтовані фінансові рішення з урахуванням обліку часової вартості грошей і максимізації прибутковості інвестицій. **Результати.** У ході дослідження автори встановили, за яких умов будівництво магістралі Київ – Львів – Варшава може стати економічно доцільним проектом. У разі збільшення обсягів пасажирських поїздів чистий дисконтований дохід зростає за лінійним законом, величина якого залежить від вартості будівництва високошвидкісної магістралі. Для збільшення прибутковості проекту важливіше зосередитися на збільшенні обсягів перевезень, ніж на зниженні вартості будівництва. **Наукова новизна.** Нові результати базуються на застосуванні таких наукових підходів, як усебічне й детальне вивчення різних аспектів проектування високошвидкісних магістралей у Європі, що надало можливість підвищити інтегрованість української і європейської транспортних систем та рекомендувати варіанти з організації високошвидкісного руху поїздів в Україні. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можливий подальший розвиток залізничної інфраструктури на напрямках упровадження високошвидкісного руху поїздів, здійснюваного шляхом інноваційного розвитку і вдосконалення науково-технічного потенціалу. Розв'язання питань упровадження методів аналізу й оцінки під час вибору варіантів високошвидкісних магістралей є основою для будівництва траси високошвидкісних магістралей на території України.

**Ключові слова:** високошвидкісний залізничний рух; залізнична колія; залізнична інфраструктура; інноваційні технології; чистий дисконтований дохід

### Вступ

Високошвидкісна залізниця є комфортним, безпечним, гнучким та екологічно доцільним видом транспорту. Починаючи з 2000 року, Європейський Союз виділив 23,7 мільярди євро

спільного фінансування для підтримки розвитку високошвидкісної залізничної інфраструктури.

Загальна довжина мережі станом на початок 2025 року становить майже 12 000 км. Лідерами за довжиною високошвидкісних ліній є Іспанія –

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

майже 4,0 тисячі кілометрів, Франція – понад 2,7 тисячі кілометрів.

ЄС має амбітну мету – збільшити довжину високошвидкісних ліній утрічі до 2030 року. Утім, Європейська комісія зазначає, що наразі існує лише набір національних високошвидкісних залізничних мереж (ВШМ), які планували та будували окремі держави-члени без достатньої міждержавної координації. У результаті лінії, що перетинають національні кордони, не є пріоритетними для окремих країн, попри підписані міжнародні угоди та вимоги Регламенту TEN-T щодо створення основних транскордонних коридорів.

Сучасний огляд поточного стану ВШМ і викликів, з якими вони стикаються, представлено в статті [13]. Дослідження [8] на прикладі Іспанії показує проблеми інтеграції високошвидкісних залізниць у пан'європейську мережу.

Європейська комісія та Європейський інвестиційний банк розробили стратегію з інтеграції залізничних мереж України, Молдови та Євросоюзу. Основний висновок проведеного дослідження полягає в необхідності побудови в Україні та Молдові нової магістральної мережі з колією 1 435 мм, яка працюватиме паралельно з наявною колією 1 520 мм на двох принципових засадах, по-перше, евроколія 1 435 мм буде призначена для швидкісних перевезень, по-друге, розвиток магістральної мережі 1 435 мм здійснюватиметься поетапно – із заходу на схід [2, 6, 9, 10].

У Національній транспортній стратегії України [5] зазначено, що основні міста повинні бути зв'язані евроколією. Планувалося, що в 2021 року розпочнеться робота над проектом будівництва в Україні залізничної мережі європейського стандарту, по якій зможуть їздити поїзди із західних країн, а повністю інтегрувати українську залізницю з європейською мережею передбачалося до 2025 року. Основними містами, з яких будуть прямувати поїзди за кордон, стануть Київ, Харків, Львів та Одеса. Згідно з новим проектом, поїзди будуть рухатися зі швидкістю від 300 до 350 кілометрів на годину. Новий маршрут дозволить значно скоротити час руху до столиці.

## Мета

Автори дослідження мають за мету показати, за яких умов будівництво магістралі Київ – Львів – Варшава може стати економічно доцільним проектом, який принесе значні економічні, соціальні та екологічні вигоди.

## Методика

Світовий досвід будівництва високошвидкісних магістралей можна розділити на два варіанти – японський і західноєвропейський. Їх особливості детально описані в монографії [4]. Відзначимо в узагальненому вигляді основні з них.

*Японський варіант* характеризується практично повною ізолюваністю колійних обладнань ВШМ від звичайних залізниць. Це викликало необхідність спорудження на всій ВШМ нових прохідних пасажирських станцій із повним комплексом обладнань. Для забезпечення зручності пересадки пасажирів з поїздів наявної мережі на високошвидкісні ці станції по можливості суміщають на одній площадці зі станціями звичайних залізниць.

*Західноєвропейський варіант* передбачає використання наявних станцій, як правило, реконструйованих і розширених. Власне пасажирські операції виконують на наявних пасажирських комплексах, на які по спеціальних з'єднаннях заходить частина високошвидкісних поїздів.

Оскільки в Україні розглядають варіант ВШМ європейського стандарту (1 435 мм), а всі наявні колії мають ширину 1 520 мм, то рекомендовано прийняти японський варіант з ізолюваністю колійних обладнань ВШМ від звичайних залізниць.

У зв'язку з інтенсивним розвитком процесів інтеграції залізничного транспорту України у європейську транспортну систему великого значення набувають такі питання, як функціонування міжнародних транспортних коридорів (МТК), упровадження спеціалізованого рухомого складу, застосування європейських технологій роботи прикордонних станцій. З урахуванням результатів вітчизняних і зарубіжних наукових розробок намічено шляхи вирішення проблеми застосування комплексного підходу до модернізації транспортних коридорів у межах України з метою підвищення швидкості руху поїздів і скорочення терміну обігу рухомого складу.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Питання перспективи розбудови інфраструктури в напрямку Румунії, Молдови і Польщі досліджено в роботі [1]. Стаття спрямована на вирішення актуальних завдань інфраструктурного розвитку в регіоні та має наукову цінність завдяки використанню передових методів та міжнародних стандартів. Водночас вона надає практичні рекомендації щодо впровадження конкретних проєктів і стратегій для поліпшення транспортної інфраструктури в зазначеному напрямку.

Особливого значення набуває питання продовження європейської колії 1 435 мм від кордонів Європи на територію України. В Україні вже є досвід використання європейської колії [3].

Для оцінки залізничних проєктів перевагу надають методам на основі визначення чистого дисконтованого доходу (Net Present Value of Discounted Cash Flow, NPV). NPV служить потужним інструментом для оцінки інвестиційних проєктів, що дозволяє приймати обґрунтовані фінансові рішення з урахуванням обліку часової вартості грошей і максимізації прибутковості інвестицій [7, 12, 14].

Розглянемо можливість і доцільність використання цих методів під час впровадження високошвидкісного руху на залізницях України, табл. 1.

Таблиця 1

## Призначення методів аналізу, переваги й недоліки

Table 1

## Purpose of analysis methods, advantages, and disadvantages

Вид аналізу	Призначення	Можливості	Сильні сторони	Слабкі сторони	Приклади
1. SWOT-аналіз	Використовують для оцінки сильних (Strengths), слабких (Weaknesses) сторін, можливостей (Opportunities) та загроз (Threats) організації чи проєкту	Виявлення внутрішніх і зовнішніх чинників, що впливають на успіх проєкту; підтримка стратегічного планування та прийняття рішень	Високий попит на міжнародні перевезення, наявна інфраструктура	Обмежена кількість рухомого складу європейської колії; конкуренція з автобусними перевізниками	Запуск маршруту Київ – Варшава через Ковель, який має скоротити час подорожі між Україною та Польщею
2. Аналіз вартості-користі (Cost-Benefit Analysis, CBA)	Оцінює співвідношення витрат і вигод від проєкту для визначення його економічної доцільності	Вимірювання фінансової ефективності інвестицій; обґрунтування вибору між кількома проєктами	Скорочення часу подорожі, стимулювання бізнесу та туризму	Землевідведення, прокладання колій 1 435 мм, електрифікація	Будівництво високошвидкісної магістралі Київ – Львів – Варшава
3. Ризик-аналіз	Ідентифікація, оцінка та управління ризиками, пов'язаними з реалізацією проєкту	Визначення ймовірності виникнення ризиків і їх впливу на результат; розробка заходів для мінімізації негативного впливу	Підвищені опори, дренажні системи	Коливання рівня води, можливі паводки; затримки в постачанні матеріалів	Будівництво моста через річку Дніпро на лінії Київ – Черкаси

Продовження таблиці 1

Continuation of Table 1

Вид аналізу	Призначення	Можливості	Сильні сторони	Слабкі сторони	Приклади
4. Аналіз конкуренто спроможності	Вивчення ринкової позиції організації або проєкту стосовно конкурентів	Оцінка унікальних переваг і недоліків; формування стратегій для підвищення конкуренто-спроможності	Центральне розташування вокзалів, відсутність контролю безпеки	Довший час подорожі порівняно з літаком	Порівняння нового швидкісного поїзда Київ – Харків з авіарейсом
5. Оцінка впливу на навколишнє середовище (Environmental Impact Assessment, EIA)	Аналіз екологічних наслідків реалізації проєкту	Визначення можливих негативних ефектів для довкілля; розробка заходів для пом'якшення впливу на природу	Створення екодуків, шумозахисних екранів; використання безшумного рухомого складу	Порушення природних екосистем, знищення флори та фауни, шум	Будівництво нової лінії Львів – Ужгород через Карпатський біосферний заповідник

Наведені в табл. 1 методи використовують для комплексного дослідження проєктів або рішень, що дає змогу підвищити ефективність управління та мінімізувати ризики в разі досягнення стратегічних цілей. Кількісна оцінка методів аналізу є важливим етапом для вибору найкращого підходу в процесі ухвалення рішень щодо перебудови залізниць України на європейський стандарт (1 435 мм).

Наразі Україна не має прямого досвіду будівництва високошвидкісних залізниць порівняно з європейськими проєктами. Незважаючи на його відсутність, Україна має стратегію розвитку високошвидкісного залізничного сполучення. Такий проєкт, як будівництво ВШМ Київ – Львів – Варшава свідчать про прагнення інтегруватися в європейську транспортну систему.

Розглянемо застосування аналізу вартості-користі (СВА) в проєкті Київ – Львів – Варшава (п.2, табл. 1), який передбачає визначення чистого приведенного доходу ( $NPV_t$ ).

Оскільки будівництво високошвидкісних магістралей – це масштабний проєкт, який, як правило, ініціюють на державному рівні, то й аналіз вартості-користі (СВА) зазвичай проводять за участю державних органів, наукових інститутів

та, можливо, із залученням міжнародних консультантів.

Перелік даних, які використано для проведення СВА, є досить великим і містить:

- дані про поточний стан транспортної системи: обсяги перевезень, структура пасажиро- та вантажопотоків, швидкість руху, щільність транспортних потоків тощо;

- прогнози розвитку економіки та населення: очікуване зростання ВВП, зміна чисельності населення, міграційні процеси тощо;

- соціально-економічні показники регіонів: рівень доходів населення, зайнятість, інвестиції тощо;

- дані про вартість будівництва та експлуатації магістралі: кошторисні розрахунки, ціни на будівельні матеріали, енергоносії тощо;

- дані про екологічні наслідки: оцінка впливу на довкілля, витрати на заходи зі зменшення негативного впливу;

- дані про соціальні наслідки: оцінка впливу на зайнятість, розвиток регіонів, безпеку руху тощо.

Зупинимося на двох пунктах, які є визначальними для оцінки інвестиційного проєкту за методом аналізу вартості-користі (СВА): обсяги перевезень і вартість будівництва

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Для оцінки ефективності будівництва високошвидкісної магістралі на новій трасі автори розробили модель прогнозування й оцінки ефективності здійснення залізничних перевезень з урахуванням усіх витрат за показником NPV [3, 11]:

$$NPV_t = \sum_{t=0}^T \frac{[(D_t - C_t - P_t) - K_t]}{(1 + E_m)^t} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $D_t$  – прогнозні річні доходи, що будуть отримані Укрзалізницею від упровадження швидкісного руху;  $C_t$  – прогнозні річні експлуатаційні витрати (без амортизаційних відрахувань) від упровадження швидкісного руху, які визначають як сумарні експлуатаційні витрати (матеріали, заробітна плата, нарахування на заробітну плату, паливо, електроенергія тощо);  $P_t$  – прогнозна величина податку на прибуток за податковим обліком у розрахунковому році від упровадження швидкісного руху поїздів;  $K_t$  – прогнозні інвестиції, необхідні для впровадження швидкісних магістралей у розрахунковому році, які визначають як річну сумарну вартість (без ПДВ) будівництва, реконструкції та технічного переоснащення інфраструктури залізниць, інвестицій на придбання рухомого складу та реконструкцію наявних депо для технічного обслуговування та ремонту поїздів швидкісного руху;  $E_m$  – модифікована норма дисконту, невизначеність і ризику під час оцінки ефективності варіантів;  $t$  – номер розрахункового року:  $t = 0, 1, 2, \dots, T$  ( $T$  – розрахунковий період).

### Результати

Розроблена модель дозволяє досліджувати й прогнозувати доходи, які отримає АТ «Укрзалізниця» від упровадження швидкісного руху поїздів для різного рівня прогнозу й обсягів перевезень на перспективу. Обсяги перевезень враховують транзитні потоки пасажирів через територію України й чисельність населення в містах, охоплених високошвидкісною мережею [4]. Оскільки на цей час більшість даних невідомі, то автори розглядають різні обсяги перевезень і встановлюють значення, за яких буде досягнуто позитивний ефект.

Під час проектування високошвидкісних магістралей (ВШМ) географічні та ландшафтні умови відіграють ключову роль для визначення вартості будівництва, вибору технологій та експлуатаційних параметрів. Для встановлення вартості будівництва ВШМ в Україні було використано середні оцінки вартості на основі європейського досвіду. Наведемо порівняльний аналіз умов проектування й будівництва ВШМ у Франції, Німеччині, Іспанії та Італії (табл. 2).

Порівняльний аналіз ключових факторів, що впливають на вартість та терміни будівництва високошвидкісних залізниць у країнах Європи наведено в табл. 3.

Найвищі витрати на будівництво ВШМ спостерігаються в Німеччині й Італії, найнижчі – в Іспанії. Франція займає проміжні позиції, а Італія має додаткові витрати через сейсмічну активність і культурну спадщину.

Для проектування ВШМ Київ – Львів – Варшава використано середні оцінки вартості на основі європейського досвіду, з урахуванням географічних, технічних і регуляторних умов України та Польщі. Розрахунок зроблено з урахуванням таких припущень і факторів:

#### 1. Орієнтовна середня вартість:

- рівнинні ділянки (70–80 % маршруту): 15–25 млн євро/км;
- складні ділянки з тунелями і мостами (10–15 %): 40–80 млн євро/км;
- урбанізовані ділянки з необхідністю обходу (5–10 %): 50–100 млн євро/км.

#### 2. Фактори, що впливають на вартість:

- географічні умови: лінія проходить здебільшого рівниною, але в Карпатах між Львовом і кордоном Польщі потрібно врахувати тунелі або віадуки;
- технічні рішення: вибір між стандартами UIC і можливим використанням суміщеної колії 1 435 мм і 1 520 мм у перехідних вузлах;
- вимоги до екології: у Польщі та ЄС екологічні обмеження суворіші, ніж в Україні, що збільшить витрати на захист навколишнього середовища;
- ціна землі: в Україні, особливо в сільській місцевості, ціна землі нижча, ніж у Польщі чи Західній Європі.

#### 3. Середні витрати на подібні проекти:

- вартість будівництва ВШМ у Польщі варіюється в межах 20–40 млн євро/км для нових ліній;

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

– в Україні залежно від масштабів будівництва і застосованих технологій – 15–30 млн євро/км є реалістичною оцінкою для рівнинних ділянок.

*4. Прогноз для ВШМ Варшава – Львів – Київ:*

– довжина маршруту: орієнтовно 820–900 км (залежно від обраного маршруту). Середня вартість будівництва на всьому маршруті:

– для базового сценарію з помірною кількістю тунелів і мостів: 20–30 млн євро/км;

– для сценарію з більш складними умовами та інтеграцією в міста: 30–50 млн євро/км.

З урахуванням вищевикладеного можна прийняти оцінку вартості (табл. 4).

Із табл. 4 випливає, що середня вартість будівництва ВШМ Варшава – Львів – Київ може скласти 20–30 млн євро/км з можливим збільшенням до 40–50 млн євро/км на складних ділянках. Загальні витрати можуть перевищувати 20–25 мільярдів євро залежно від обраного маршруту, технічних рішень і регуляторних вимог.

Таблиця 2

**Географічні особливості проєктування й екологічні вимоги до ВШМ в країнах Європи**

Table 2

**Geographical features of HSR design and environmental requirements in european countries**

Країна	Географічні особливості	Вплив на будівництво ВШМ	Екологічні вимоги
Франція Помірна щільність населення (близько 123 осіб/км <sup>2</sup> ). Основні міста з'єднано прямими маршрутами без потреби в складній інтеграції в густо забудованих районах	Переважає рівнинний рельєф, зокрема в північній і центральній частинах країни Гірські регіони на півдні (Альпи, Піренеї) впливають лише на окремі ділянки	Відносно низька кількість тунелів і мостів у порівняно з іншими країнами Будівництво перших ліній (LGV) було менш складним через сприятливі природні умови	Високі екологічні стандарти, але рівень шумозахисних заходів і контроль за впливом на природні екосистеми добре регульовані й менш дорогі порівняно з деякими іншими країнами
Німеччина Дуже висока щільність населення (близько 240 осіб/км <sup>2</sup> ) та щільна міська забудова	Різноманітний рельєф: гори в центральній частині, пагорби та рівнини на півночі, густі лісові масиви Висока щільність міської забудови	Часте використання тунелів і мостів для подолання природних бар'єрів Складна інтеграція ліній у густозаселених районах	Одні з найжорсткіших у Європі Суворі стандарти з шумозахисту, ландшафтного відновлення та мінімізації впливу на природні зони
Іспанія Низька щільність населення (близько 94 особи/км <sup>2</sup> ) Малі витрати на землю та відносно простий доступ до територій для будівництва	Гористий рельєф займає значну частину території (Сьєрра-Морена, Кантабрійські гори) Велика кількість пустельних і малонаселених районів	Широке використання тунелів і мостів у гірських районах Відносно низька вартість земель через малу щільність населення	Хоча Іспанія дотримується європейських стандартів, її вимоги менш жорсткі, ніж у Німеччині або Італії Пріоритет надано використанню відкритих просторів, що знижує потребу в тунелях і захисних спорудах

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Продовження таблиці 2

Continuation of Table 2

Країна	Географічні особливості	Вплив на будівництво ВШМ	Екологічні вимоги
Італія Середня щільність населення (близько 200 осіб/км <sup>2</sup> ), але велика кількість густозаселених регіонів у північній частині країни Часте будівництво в міських і передміських зонах	Дуже складний рельєф із численними гірськими масивами (Апенніни, Альпи) Висока щільність міської забудови, особливо на півночі	Величезна кількість тунелів (на деяких лініях понад 60% траси проходить під землею) Високі витрати на будівництво мостів і тунелів, а також посилення сейсмостійкості	Жорсткі, з особливим акцентом на сейсмостійкість, охорону природи та історичних пам'яток Значні витрати на шумозахист, екологічні коридори та захист ландшафтів

Таблиця 3

## Порівняльний аналіз основних факторів, що визначають вартість будівництва ВШМ

Table 3

## Comparative analysis of key factors determining HSR construction costs

Критерій	Країна			
	Франція	Німеччина	Іспанія	Італія
Вартість робочої сили	Висока	Дуже висока	Низька	Середня
Інноваційні технології	Дуже високий рівень	Високий рівень	Оптимізовані для економії	Сейсмостійкість та автоматизація
Отримання дозволів	Помірний рівень складності	Дуже складно	Відносно просто	Складно
Екологічна експертиза	Високі вимоги	Дуже високі вимоги	Гнучкі вимоги	Жорсткі вимоги
Узгодження проєктів	Ефективне	Тривалий процес	Прискорене	Бюрократично складне
Вартість, млн євро/км	20–29	28–50	16–19	30–51

Таблиця 4

## Вартість будівництва ВШМ Варшава – Львів – Київ

Table 4

## Construction cost of the HSR Warsaw–Lviv–Kyiv

Ділянка	Довжина, км	Середня вартість, млн євро/км	Загальна вартість, млн євро
Варшава – кордон	350	25	8 750
Кордон – Львів	200	30	6 000
Львів – Київ	300	20	6 000
Загальні дані	850	25–30	21 250–25 500

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Для виконання розрахунків за формулою (1) необхідно мати вихідні дані щодо високошвидкісного рухомого складу на напрямку Київ – Львів – Варшава. Зараз це питання потребує додаткових досліджень.

Польща активно розвиває свою високошвидкісну залізничну мережу, має досвід експлуатації високошвидкісних поїздів, зокрема моделей Siemens Velaro. Польські залізниці також розглядають й інші сучасні моделі, такі як Alstom AGV та Bombardier Velaro.

Спроектовано високошвидкісну залізницю «Спиця № 5» між Травниками та Белжецем, що проходить найближче до українського кордону та дозволить продовжити її до Львова. Під час вибору рухомого складу для високошвидкісної залізниці «Спиця № 5» буде враховано такі фактори:

- технічні характеристики колії: максимальна швидкість, радіуси кривих, ухили;
- пасажиропотік: очікувана кількість пасажирів, структура поїздів (міжміські, регіональні);
- інтеграція з іншими лініями: сумісність із наявним рухомих складом, стандарти сполучення;
- економічні фактори: вартість придбання та обслуговування, енергоефективність.

Зважаючи на європейські стандарти та досвід інших країн, можна допустити, що для «Спиці № 5» буде розглянуто моделі рухомого складу, які вже успішно експлуатують у багатьох країнах Європи, що підтверджує їхню надійність та ефективність:

- Siemens Velaro: популярна модель, яку експлуатує багато європейських залізниць. Відрізняється високою швидкістю, комфортом та надійністю;
- Alstom AGV: інноваційний поїзд з активним нахилом кузова, що дозволяє розвивати високу швидкість на кривих ділянках колії;
- Bombardier Velaro: ще одна популярна модель, що відрізняється високою швидкістю та комфортом.

Передбачаючи інтеграцію з українською мережею, під час вибору рухомого складу необхідно враховувати перспективи продовження лінії в сторону Львова та сумісність із наявною інфраструктурою в Україні.

Для подальших розрахунків прийнято рухомий склад Siemens Velaro для високошвидкісного обслуговування, оскільки він сертифікований для роботи в Польщі та може бути адаптований для українських умов. Експлуатаційна швидкість 250–300 км/год, середня маса поїзда 500 тонн, пасажиромісткість 450–600 пасажирів.

Варіантні розрахунки за розробленою моделлю, формула (1), дозволили отримати результати, що представлені на рис. 1.

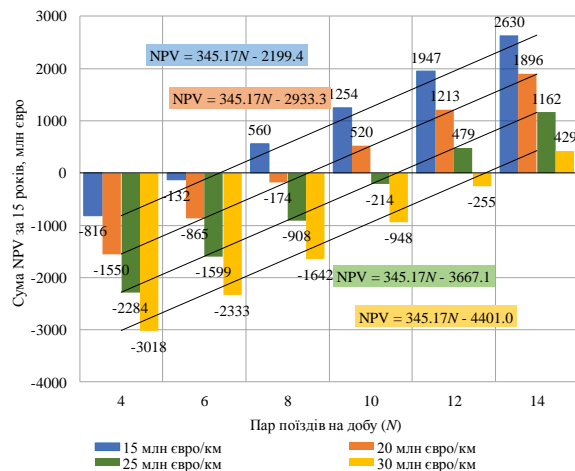


Рис. 1. Чистий дисконтований дохід залежно від кількості пасажирських поїздів і вартості будівництва

Fig. 1. Net Present Value depending on the number of passenger trains and construction cost

З аналізу рис. 1 випливає, що велике значення на остаточне рішення мають такі основні параметри, як вартість будівництва, яка була прийнята в діапазоні 15–30 млн евро/км, і обсяги пасажирських перевезень, прийняті від 4 до 14 пар поїздів на добу.

За відносно невисоких витрат (15 млн евро/км) позитивне рішення щодо будівництві нової високошвидкісної магістралі можна отримати вже в термін 12,5 років для кількості 7 пар поїздів на добу  $\sum_{t=0}^T NPV_t = 126$  млн евро, у разі вартості 20 млн евро/км – у термін 13,5 років для кількості 9 пар поїздів на добу  $\sum_{t=0}^T NPV_t = 173$  млн евро; у разі вартості 25 млн евро/км – у термін 14 років для кількості

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

11 пар поїздів на добу  $\sum_{t=0}^T NPV_t = 133$  млн євро; за вартості 30 млн євро/км – у термін 14,5 років для кількості 13 пар поїздів на добу  $\sum_{t=0}^T NPV_t = 84$  млн євро, рис. 2.

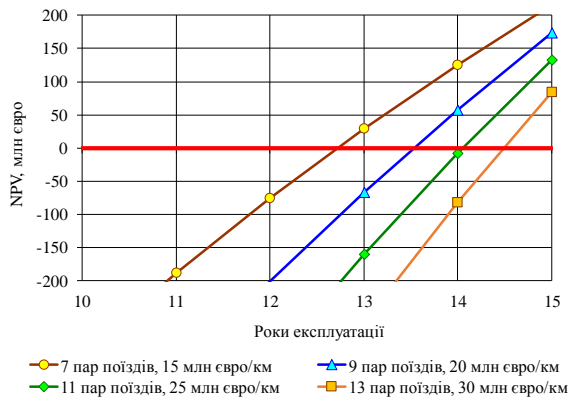


Рис. 2. Чистий дисконтований дохід для ВШМ Варшава – Львів – Київ (1 435 мм)

Fig. 2. Net Present Value for the HSR Warsaw – Lviv – Kyiv (1 435 mm)

У разі збільшення обсягів пасажирських поїздів чистий дисконтований дохід зростає за лінійним законом, величину якого можна визначити за формулою:

$$\sum_{t=0}^T NPV_t = 345,17 \cdot N - 146,77 \cdot B + 2,17 \quad (2)$$

де  $N$  – кількість пар пасажирських поїздів на добу;  $B$  – вартість будівництва високошвидкісної магістралі у млн євро віднесена до 1 км.

З аналізу формули (2) можна зробити такі висновки:

– коефіцієнт перед  $N$  (345,17) більший за абсолютним значенням, ніж коефіцієнт перед  $B$  (146,77). Це означає, що зміна обсягу перевезень на одну одиницю матиме більший вплив на значення  $NPV$ , ніж зміна вартості будівництва на одну одиницю;

– обидва коефіцієнти мають різні знаки: перед  $N$  – додатний, а перед  $B$  – від’ємний. Це означає, що збільшення обсягу перевезень призводить до збільшення  $NPV$ , а збільшення вартості будівництва – до зменшення  $NPV$ ;

– вільний член (2,17) відображає певний базовий рівень  $NPV$ , який не залежить від обсягу перевезень та вартості будівництва.

Згідно з наведеною формулою (2), обсяг перевезень ( $N$ ) має більш суттєвий вплив на величину чистого дисконтованого доходу ( $NPV$ ), ніж вартість будівництва ( $B$ ). Це означає, що для збільшення прибутковості проекту важливіше зосередитися на збільшенні обсягів перевезень, ніж на зниженні вартості будівництва.

### Наукова новизна та практична значимість

Нові результати базують на застосуванні таких наукових підходів, як усебічне й детальне вивчення різних аспектів проектування високошвидкісних магістралей у Європі, що надало можливість підвищити інтегрованість української і європейської транспортних систем та рекомендувати варіанти організації високошвидкісного руху поїздів в Україні.

На основі отриманих результатів можливий подальший розвиток залізничної інфраструктури на напрямках упровадження високошвидкісного руху поїздів, здійснюваного шляхом інноваційного розвитку і вдосконалення науково-технічного потенціалу.

Розв’язання питань упровадження методів аналізу й оцінки під час вибору варіантів високошвидкісних магістралей є основою для прокладання й будівництва траси високошвидкісних магістралей на території України.

### Висновки

У роботі використано аналіз вартості-користі (Cost-Benefit Analysis), який надає можливість отримувати чистий приведений дохід (Net Present Value). Це найпоширеніший метод у країнах Європи, який дозволяє порівнювати вартість грошей у різні періоди часу й показує, чи проект принесе додаткову вартість.

За результатами проведеного дослідження встановлено, за яких умов будівництво магістралі Київ – Львів – Варшава може стати економічно доцільним проектом: за вартості 15 млн євро/км і 7 пар поїздів на добу, у разі вартості 20 млн євро/км і 9 пар поїздів на добу, за вартості 25 млн євро/км і 11 пар поїздів на добу,

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

у разі вартості 30 млн євро/км і 13 пар поїздів на добу.

У випадку збільшення обсягів пасажирських поїздів чистий дисконтований дохід зростає за лінійним законом, величина якого залежить від вартості будівництва високошвидкісної магістралі. Для збільшення прибутковості проекту важливіше зосередитися на збільшенні обсягів перевезень, ніж на зниженні вартості будівництва.

Будівництво високошвидкісної магістралі Київ–Львів–Варшава матиме значний вплив на економіку регіонів, через які вона пролягатиме. Основні позитивні ефекти:

– розвиток економічної активності: магістраль стане потужним стимулом для розвитку промисловості, сільського господарства, туризму та інших галузей економіки в регіоні;

– створення нових робочих місць: під час будівництва та експлуатації магістралі буде створено значну кількість робочих місць, що сприятиме зниженню рівня безробіття;

– залучення інвестицій: поява високошвидкісної магістралі зробить регіон більш привабливим для інвесторів, що сприятиме розвитку нових підприємств і бізнесів;

– збільшення обсягів торгівлі: магістраль поліпшить транспортну доступність регіону, що сприятиме збільшенню обсягів торгівлі з іншими регіонами України та країнами Європи;

– розвиток туризму: швидкісне сполучення між великими містами сприятиме розвитку туризму, що принесе додаткові доходи в регіон.

Для будівництва високошвидкісної магістралі можуть бути використані інноваційні технології, які дозволять забезпечити високу якість і безпеку спорудження, а також мінімізувати негативний вплив на довкілля.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баль О. М., Болжеларський Я. В., Баб'як М. О., Терещак Ю. В., Солодяк Л. Й. Перспективи розбудови інфраструктури в напрямку Румунії, Молдови і Польщі. *Транспортні системи та технології*. 2023. Вип. 26. С. 14–29. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2023/293340>
2. Водяний А. ЄС розробив стратегію переходу України на євроколію 1435 мм. *LIGA.net*. 2023. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-gazrabortal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta>
3. Курган М. Б., Курган Д. М. *Науково-технічне забезпечення залізничного сполучення Україна–Євросоюз*: монографія. Дніпро : ПФ «Стандарт-Сервіс». 2018. 268 с.
4. Курган М. Б., Курган Д. М. *Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні*: монографія. Дніпро : Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2016. 284 с.
5. *Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року*. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/NT3297>
6. A European high-speed rail network: not a reality but an ineffective patchwork. *European Court of Auditors Publications a European high-speed rail network*. URL: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/high-speed-rail-19-2018/en/>
7. Arga K., Susetyo B., Syafwandi S. Feasibility study of a railway construction project as intermodal transportation in Tanjung Perak port. *Sinergi*. 2021. Vol 25, No 1. P. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.22441/sinergi.2021.1.008>
8. Buier N. The second coming of rail: the spanish high-speed rail- finance complex. *Antipode*. 2020. Vol. 52. Iss. 6. P. 1603–1623. DOI: <https://doi.org/10.1111/anti.12672>
9. Flaviu N. I. Railway border connections, double railway gauge in Romania during Ukraine crisis and development possibilities. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2928. Iss. 1. P. 190014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0170536>
10. Hubar O., Markul R., Tiutkin O., Andrieiev V., Arbutov M., Kovalchuk V. Study of the interaction of the railway track and the rolling stock under conditions of accelerated movement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012007>

11. Kurhan M., Fischer S., Tiutkin O., Kurhan D., Hmelevska N. Development of High-Speed Railway Network in Europe: A Case Study of Ukraine. *Polytechnica Transportation Engineering*. 2024. Vol. 52. Iss. 2. P. 151–158. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.23464>
12. Priyanto S., Churniawan E., Darmawan E. S. Financial feasibility study and economic impact of Krl electrification project development yogyakarta – solo. *Jurnal Syntax Transformation*. 2023. Vol. 4. Iss. 7. P. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.46799/jst.v4i7.760>
13. Russo F., Sgro D., Musolino G. Sustainable Development of Railway Corridors: Methods and Models for High Speed Rail (HSR) Demand Analysis. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023 Workshops*. 2023. P. 527–538. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37123-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37123-3_36)
14. Venezia E. Cost–benefit analysis in high-speed railway projects: appraisal of methodological approaches and an initial social equity evaluation, a case study. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 14. P. 11344. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151411344>

M. B. KURHAN<sup>1</sup>, D. M. KURHAN<sup>2</sup>, N. P. KHMELEVSKA<sup>3</sup>, D. L. KOVALSKYI<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail [m.b.kurhan@ust.edu.ua](mailto:m.b.kurhan@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail [d.m.kurhan@ust.edu.ua](mailto:d.m.kurhan@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-9448-5269

<sup>3</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail [n.p.hmelevska@ust.edu.ua](mailto:n.p.hmelevska@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-2360-8671

<sup>4</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail [mail.kvalskyid@gmail.com](mailto:mail.kvalskyid@gmail.com), ORCID 0000-0002-0247-2074

## Prospects for the Implementation of High-Speed Railway in Ukraine

**Purpose.** The European Union has an ambitious goal of significantly expanding the network of high-speed railway lines. Currently, Ukraine lacks direct experience in constructing high-speed railways compared to European projects. Despite this, Ukraine has a strategy for developing high-speed rail connections. This study aims to analyze and justify the conditions under which the construction of the Kyiv–Lviv–Warsaw high-speed rail corridor can become an economically viable project, bringing significant economic, social, and environmental benefits. **Methodology.** To assess the feasibility of constructing a high-speed railway along a new route, the authors applied a forecasting and efficiency evaluation model for railway transportation, considering all costs using the NPV (Net Present Value of Discounted Cash Flow) indicator. NPV serves as a powerful tool for investment project evaluation, allowing for informed financial decision-making by considering the time value of money and maximizing investment profitability. **Findings.** The study identifies the conditions under which the construction of the Kyiv–Lviv–Warsaw high-speed rail corridor can become an economically viable project. As passenger train volumes increase, the net discounted revenue grows linearly, with its magnitude depending on the construction costs of the high-speed railway. To enhance project profitability, it is more critical to focus on increasing transportation volumes rather than reducing construction costs. **Originality.** The new findings are based on the application of scientific approaches such as a comprehensive and detailed study of various aspects of high-speed railway design in Europe. This has enabled the improvement of the interoperability between Ukrainian and European transport systems and provided recommendations for organizing high-speed rail services in Ukraine. **Practical value.** Based on the obtained results, further development of railway infrastructure along high-speed rail corridors is possible through innovative advancements and the enhancement of scientific and technological potential. Addressing issues related to the implementation of analysis and evaluation methods for selecting high-speed rail options serves as the foundation for the planning and construction of high-speed railway routes in Ukraine.

**Keywords:** high-speed rail transport; railway track; railway infrastructure; innovative technologies; net present value

### REFERENCES

1. Bal, O., Bolzhelarskyi, Ya., Babyak, M., Tereshchak, Yu., & Solodiak, I. (2023). Prospects of infrastructure development towards romania, moldova and poland. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 26, 14-29. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2023/293340> (in Ukrainian)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

2. Vodiani, A. (2023). EU readies plans for Ukraine's transition to European railway track. *LIGA.net*. Retrieved from <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta> (in Ukrainian)
3. Kurhan, M. B., & Kurhan, D. M. (2018). *Naukovo-tehnicne zabezpechennia zaliznychnoho spoluchennia Ukraina–Yevrosoiuz: Monohrafiia*. Dnipro: PF «Standart-Servis». (in Ukrainian)
4. Kurhan, M. B., & Kurhan, D. M. (2016). *Teoretychni osnovy vprovadzhennia vysokoshvydkisnoho rukhu poizdiv v Ukraini: monohrafiia*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
5. *Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku*. (2023). Ministry of Infrastructure of Ukraine. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> (in Ukrainian)
6. A European high-speed rail network: Not a reality but an ineffective patchwork (2018). *European Court of Auditors*. Retrieved from <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/high-speed-rail-19-2018/en/> (in English)
7. Arga, K., Susetyo, B., & Syafwandi, S. (2020). Feasibility study of a railway construction project as intermodal transportation in tanjung perak port. *Sinergi*, 25(1), 59-68. DOI: <https://doi.org/10.22441/sinergi.2021.1.008> (in English)
8. Buier, N. (2020). The Second Coming of Rail: The Spanish High-Speed Rail- Finance Complex. *Antipode*, 52(6), 1603-1623. DOI: <https://doi.org/10.1111/anti.12672> (in English)
9. Flaviu, N. I. (2023). Railway border connections, double railway gauge in Romania during Ukraine crisis and development possibilities. *AIP Conference Proceedings*, 2928(1), 190014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0170536> (in English)
10. Hubar, O., Markul, R., Tiutkin, O., Andrieiev, V., Arbuzov, M., & Kovalchuk, O. (2020). Study of the interaction of the railway track and the rolling stock under conditions of accelerated movement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012007> (in English)
11. Kurhan, M., Fischer, S., Tiutkin, O., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2024). Development of High-Speed Railway Network in Europe: A Case Study of Ukraine. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 52(2), 151-158. DOI: <https://doi.org/10.3311/pptr.23464> (in English)
12. Priyanto, S., Churniawan, E., & Darmawan, E. S. (2023). Financial feasibility study and economic impact of krl electrification project development yogyakarta - solo. *Jurnal Syntax Transformation*, 4(7), 58-68. DOI: <https://doi.org/10.46799/jst.v4i7.760> (in English)
13. Russo, F., Sgro, D., & Musolino, G. (2023). Sustainable Development of Railway Corridors: Methods and Models for High Speed Rail (HSR) Demand Analysis. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023 Workshops*, 527-538. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37123-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37123-3_36) (in English)
14. Venezia, E. (2023). Cost–Benefit Analysis in High-Speed Railway Projects: Appraisal of Methodological Approaches and an Initial Social Equity Evaluation, A Case Study. *Sustainability*, 15(14), 11344. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151411344> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.12.2024

Прийнята до друку: 26.03.2025

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 04.4`2:004.8

О. А. СИРОТА<sup>1\*</sup>, В. М. ГОРЯЧКІН<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (098) 359 60 01, ел. пошта sirotaalexandr30@gmail.com, ORCID 0000-0001-7391-2471

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

## Проблеми рефакторингу програмного коду із застосуванням штучного інтелекту

**Мета.** Сучасний технологічний ландшафт характеризується стрімким розвитком програмного забезпечення, орієнтованого на різноманітні предметні галузі та платформи. Це зумовлює неперервне створення нових програмних продуктів, що складаються з величезної кількості рядків коду. Процес розробки якісного програмного забезпечення є багатоетапним і містить низку факторів, які впливають на кінцевий результат. Серед ключових аспектів виділяють компетентність розробників, ефективність проектного менеджменту, доступність необхідних ресурсів та здатність адаптуватися до змінних вимог. Кожна платформа має свої специфічні особливості, які необхідно враховувати під час розробки, що додатково ускладнює процес створення універсальних та ефективних програмних рішень. Наше дослідження має на меті здійснити комплексний аналіз потенціалу та перспективних напрямів застосування великих мовних моделей у контексті рефакторингу програмного коду. Робота спрямована на розробку та вдосконалення методів, які сприятимуть підвищенню ефективності процесу рефакторингу за допомогою цих моделей. **Методика.** Для вирішення вищезазначених проблем запропоновано реалізувати комплекс методів, які можуть бути застосовані як окремо, так і в синергії, з метою оптимізації кінцевого результату. Ці методи, ретельно розроблені в контексті сучасних парадигм програмної інженерії, спрямовані на підвищення ефективності процесу рефакторингу, забезпечуючи при цьому збереження функціональності програмного забезпечення. Їх імплементація передбачає систематичний підхід до аналізу та модифікації кодової бази, враховуючи як технічні аспекти, так і потенційний вплив на загальну архітектуру системи. **Результати.** Проведено комплексний аналіз наявних мовних моделей та розроблено методи підвищення ефективності великих мовних моделей у контексті рефакторингу коду. Виявлено ключові фактори, що впливають на успішність застосування запропонованих методів, зокрема обсяг навчальних даних та обмеження контексту моделі. **Наукова новизна.** Розроблено підхід до підвищення ефективності великих мовних моделей у рефакторингу коду, що враховує специфіку різних проєктів та етапів розробки. Запропоновано інноваційні методи донавчання мовних моделей та оптимізації використання контексту, що розширюють можливості автоматизованого рефакторингу. **Практична значимість.** Результати дослідження дозволяють поліпшити ефективність рефакторингу коду із застосуванням великих мовних моделей.

*Ключові слова:* програмна інженерія; штучний інтелект; велика мовна модель; рефакторинг; програмний код; якість програмного коду

### Вступ

У сучасному світі застосування програм, розроблених для різних операційних систем і платформ, є частиною нашого повсякденного

життя. Щодня ми використовуємо застосунки, які підтримують такі операційні системи, як Web, iOS, Android, MacOS, Windows і Linux. Необхідність використання програмного забезпечення, орієнтованого на різні предметні галузі,

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

стала причиною безперервної появи нових програмних продуктів, що являють собою незліченну кількість рядків коду.

Створення якісного програмного забезпечення (ПЗ) складається з декількох етапів. Різні етапи імплементації програмного продукту містять сукупність факторів, які можуть впливати на процес як позитивно, так і негативно [3]. До таких факторів належать:

- знання та досвід розробників;
- якість проєктного менеджменту;
- наявність необхідних ресурсів;
- часті зміни вимог до програмного забезпечення.

Важливо враховувати також те, що кожній платформі притаманні конкретні особливості ПЗ, які впливають на процес розробки, підтримку певних функцій. Крім того, наявність різних проблем, а також вплив факторів, описаних вище, може призводити до зниження якості вихідного коду, а в результаті – самого програмного засобу. Найбільш поширеними є такі проблеми [2, 7]:

- вихідний код поганої якості;
- недостатня продуктивності програми, яка виражається у повільній роботі інтерфейсу користувача: замалій кількості зображених кадрів за секунду, «зависання»;
- надлишкове використання оперативної пам'яті під час виконання, яке може призводити до екстреного завершення роботи;
- складнощі розуміння наявного коду, що негативно впливає на швидкість реалізації нового функціоналу;
- збільшення кількості розробників у команді недостатньо поліпшує або взагалі не поліпшує швидкість розробки;
- вартість реалізації продукту постійно зростає.

Одним із ефективних інструментів поліпшення якості та внутрішньої структури коду без зміни бізнес-логіки є рефакторинг. Завдяки йому код стає більш читабельним, обслуговування та розширення функцій має меншу складність, усуваються технічні заборгованості, а також підвищується продуктивність. Складність застосування такого інструменту може часто залежати від проєкту. Якщо проєкт досить великий і на додачу має застарілу кодову базу, то це суттєво впливає на складність проведення рефакторингу.

Штучний інтелект (ШІ) з його можливостями надшвидкого предиктивного аналізу та обробки великих обсягів даних можна використовувати, щоб значною мірою автоматизувати процес рефакторингу коду. Підхід на основі штучного інтелекту полягає в тому, що його інструменти проводять аналіз різного за обсягом коду, виявляють архітектурні помилки, порушення загальноприйнятих принципів програмування, такі як повторювані шаблони, та автоматично проводять рефакторинг або пропонують можливі рішення розробнику [7].

Проте, окрім значного приросту в продуктивності, ШІ показав, що має досить вагомні недоліки і труднощі, які можуть трапитись під час його використання.

Однією з найвагоміших проблем використання ШІ є обмежене розуміння повного контексту проєкту. Великі мовні моделі (LLM) мають контекст обмеженого розміру. Розмір контексту впливає на можливість «розуміння» мовною моделлю загальної архітектури проєкту, залежностей між програмними модулями і потенційних наслідків змін у кодовій базі, що робить процес менш ефективним. Рефакторинг ізольованої функції може здаватися цілком задовільним, але може порушити роботу інших модулів через те, що LLM не враховує всіх залежностей. Без цілісного уявлення про проєкт зміни, внесені штучним інтелектом, мають більшу ймовірність помилки або можуть порушити наявну функціональність у складній кодовій базі [7].

Ще одним недоліком є наявність проблеми із забезпеченням функціональної відповідності між початковим програмним кодом та кодом після рефакторингу з використанням LLM [7]. Часто функціональна відповідність порушується на перший погляд непомітною помилкою, наприклад, помилкою може бути використання оператором невідповідної мови програмування. Такі результати роботи LLM призводять до невідповідності роботи системи зазначеним вимогам.

Іншими, але не менш вагомими є такі проблеми [7]:

- ризик створення вразливостей у системі безпеки: інструменти штучного інтелекту можуть створювати вразливості в системі, якщо вони не розроблені з урахуванням певних вимог;

– legacy code може бути складним та незрозумілим, що додає ймовірності до того, що розробник помилиться, перевіряючи запропоновані зміни ШІ-помічником.

### Мета

Основною метою роботи є аналіз можливостей та перспектив застосування великих мовних моделей до рефакторингу програмного коду, а також розробка методик їх поліпшення для збільшення ефективності рефакторингу.

### Методика

До найбільш поширених великих мовних моделей належать GPT, Gemini, Llama, PaLM. Ці мовні моделі мають велику кількість параметрів, різну продуктивність у контексті різних завдань та конкурують між собою. Проте наявні дослідження в галузі рефакторингу коду свідчать, що використання стандартних LLM є досить ризиковим, бо кращому випадку велика мовна модель дає лише 37 % ймовірності успіху (табл. 1).

Таблиця 1

### Коректність рефакторингу для низки популярних LLM [4]

Table 1

#### Refactoring correctness for a number of popular LLMs [4]

Модель ШІ	Правильний код (перевірка синтаксису рефакторингованого коду)	Якість коду поліпшено (чи зміна коду штучним інтелектом поліпшила його)	Правильний рефакторинг (чи проходять тести після того, як ШІ змінив код)
PaLM 2 code	99,93 %	68,75 %	37,29 %
GPT–3.5	100 %	69,89 %	30,26 %
PaLM 2t	100 %	66,54 %	34,73 %
phind-codellama–34B–v2	100 %	78,76 %	18,14 %

Велика кількість помилок є неочевидною для людського ока під час перевірки. ШІ, заснованому на LLM, бракує сурового розуміння «коректності». Він може передбачати кожен наступний токен на основі ймовірності, але не виконує і не перевіряє коду. Враховуючи те, що програмування є набагато більш обмеженим, ніж людський діалог, це може бути проблемою. Так, наприклад, у природній мові вибір одного синоніма замість іншого зазвичай не впливає на суть тексту, однак у програмному коді кожен символ формує функціональність програми. Приклад подібної проблеми показано на рис. 1.

Крім того, наявні дослідження показують, що поліпшення використання контексту LLM має сенс [7].

Для вирішення описаних вище проблем можна реалізувати декілька методів, використаних

окремо або в сукупності з іншими для досягнення кращого кінцевого результату.

Як відомо, обсяг вхідних даних під час застосування LLM впливає на якість вихідних даних, що є результатом роботи великої мовної моделі. Але це стосується не лише даних, які зберігаються в контексті, але й тих, на основі яких модель навчалась [5-6]. Одним із методів, який пропонується використовувати для поліпшення роботи LLM у контексті рефакторингу, є тонке налаштування великої мовної моделі.

Тонке налаштування являє собою процес додаткового навчання попередньо навченої великої мовної моделі (LLM) на нових або додаткових даних із метою її адаптації для виконання специфічних завдань або роботи з наборами даних, що є характерним для певної предметної галузі [1, 5, 6] і відповідає передбачуваному застосуванню.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

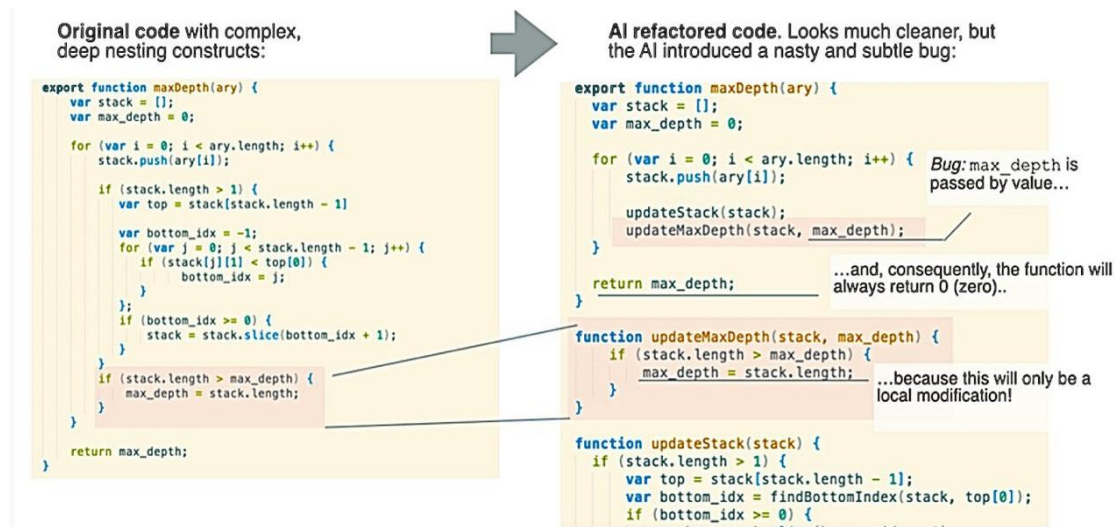


Рис. 1. Малопомітна помилка, створена штучним інтелектом

Fig. 1. A subtle error created by artificial intelligence

Основною метою тонкого налаштування моделі є підвищення її ефективності для виконання конкретних завдань, цього досягають використанням узагальнених знань, здобутих під час початкових етапів навчання, а також нових знань, отриманих на етапі додаткового навчання. Процес тонкого налаштування передбачає такі етапи (рис. 2):

1. Вибір попередньо навченої моделі: починають із використання попередньо навченої великої мовної моделі (LLM), такої як GPT-3 або BERT, яка вже освоїла розуміння мови на основі великого обсягу текстових даних.

2. Підготовка даних: здійснюють збір та підготовку набору даних, що є специфічним для певного завдання або галузі. Цей набір даних має бути ретельно очищений та анотований для забезпечення його репрезентативності для заданої програми.

3. Додаткове навчання, що містить:

3.1. Кероване навчання: модель навчається на основі маркованих даних, що дозволяє їй встановлювати відповідність між вхідними даними та бажаними виходами, при цьому мінімізуючи функцію втрат.

3.2. Навчання з підкріпленням: передбачає надання моделі зворотного зв'язку у вигляді винагороди за генерацію бажаних результатів, що дозволяє оптимізувати її продуктивність на основі отриманого зворотного зв'язку.

3.3. Налаштування параметрів моделі на основі нового набору даних: налаштування може передбачати повне точне налаштування, яке передбачає оновлення всіх шарів моделі. Такий підхід потребує значних обчислювальних ресурсів, але забезпечує всебічну адаптацію.

3.4. Перепрофілювання: під'єднання шару вбудовування моделі до класифікатора, спеціально призначеного для конкретного завдання. Хоча такий метод є менш ресурсоємним, він може не забезпечувати такого ж рівня продуктивності, як повне точне налаштування.

3.5. Оцінка та валідація: після завершення етапу додаткового навчання ефективність моделі підлягає ретельній оцінці з використанням валідаційного набору даних. Це потрібно для підтвердження, що модель досягає необхідної точності та функціональності відповідно до специфікацій конкретного завдання.

3.6. Розгортання: після досягнення задовільних показників роботи модель може бути інтегрована в реальні додатки, де вона здатна генерувати результати, адаптовані до специфічного контексту, для якого була проведена її оптимізація.

Однією з переваг точного налаштування є підвищення продуктивності моделі, оскільки таке налаштування здатне суттєво поліпшити точність і відповідність результатів для визначених завдань. Крім того, додатково навчена LLM стає більш вузькоспеціалізованою. Інакше ка-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

жучи, процес тонкого налаштування надає можливість моделі стати експертною у конкретній сфері, у нашому випадку в рефакторингу.

Важливо зазначити, що тонке налаштування потребує значно менше даних та обчислювальних ресурсів порівняно з навчанням моделі від початку, тому є більш ефективним шляхом, ніж навчання моделі від початку [5, 6, 8]. Завдяки тонкому налаштуванню на основі наявного вихідного коду, документації та інших відомостей про програмний засіб, який підлягає рефакторингу, якість результату роботи мовної моделі може значно зрости.

## Результати

Запропонований вище алгоритм передбачає додаткове навчання моделі кожного разу, коли нові зміни вихідного коду потрапляють до системи контролю версій (рис. 3). Мовна модель навчається на вже написаному коді, документації тощо. Таким чином, з кожною ітерацією розробки модель починає краще «розуміти» відповідну програмну систему, що впливає на процес генерації коду, роблячи його більш коректним.

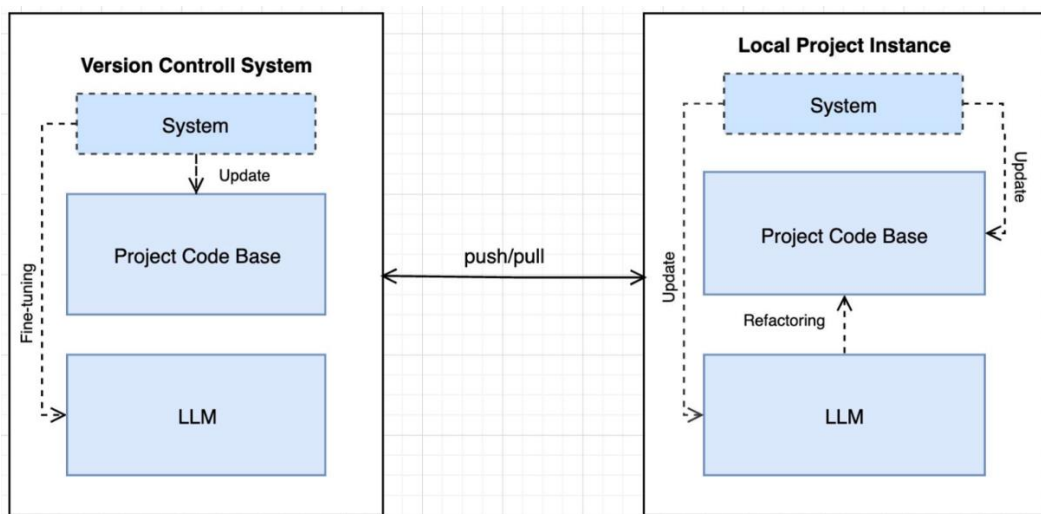


Рис. 2. Процес додаткового навчання LLM у процесі роботи над програмою

Fig. 2. The process of additional LLM training in the process of working on the program

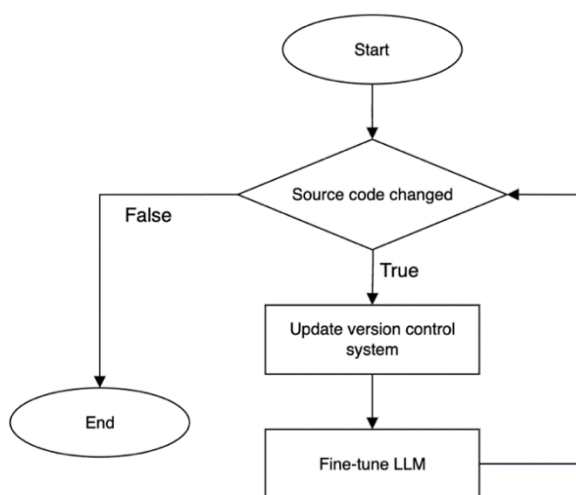


Рис. 3. Схема алгоритму додаткового навчання LLM

Fig. 3. Diagram of the LLM supplementary learning algorithm

Проте у процесу додаткового навчання великих мовних моделей є й певні виклики. Один із найважливіших – обчислювальні витрати, які можуть вимагати значних ресурсів. Іншим важливим фактором є якість даних, оскільки успішність точного налаштування значною мірою залежить від якості та репрезентативності набору даних, використаного для цього процесу. Також слід зауважити, що потенційний ризик надмірної спеціалізації моделі в результаті точного налаштування може призвести до зниження її здатності узагальнювати та інтерпретувати широкий спектр мовних конструкцій. Ще одним недоліком запропонованого методу додаткового навчання є те, що використання додатково навченої моделі для рефакторингу іншого програмного продукту є неможливим, оскільки дані, на яких LLM навчалась, не відповідають тим, що мають бути опрацьовані.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Як ще один метод для поліпшення роботи великої мовної моделі можна застосовувати метод індексації контексту LLM (рис. 4).

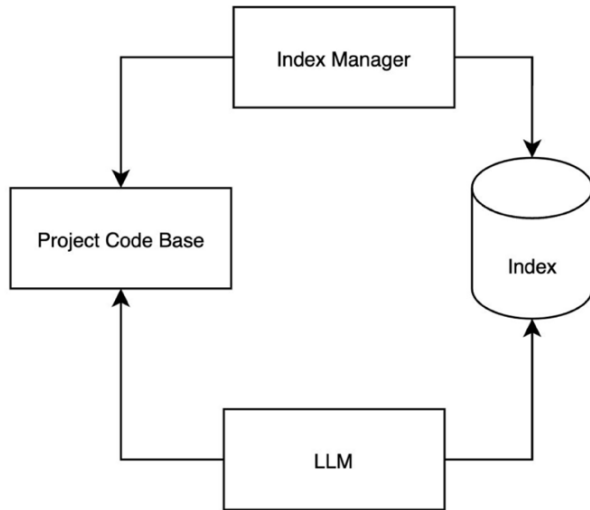


Рис. 4. Схема застосування індексації контексту LLM

Fig. 4. Scheme of application of LLM context indexing

Це дає змогу зберігати в контексті моделі велику кількість залежностей файлів із вихідним кодом за допомогою індексації, при цьому не завантажуючи сам вміст цих файлів у пам'ять ЕОМ без потреби. У разі застосування цього підходу кожному файлу з вихідним кодом присвоюють індекс і встановлюють залежності між індексами, що відповідають файлам, які зберігаються в базі даних. LLM під час рефакторингу, використовуючи індекси, «розуміє», від яких файлів залежить поточний файл, і завантажує в пам'ять вміст лише необхідних файлів. Такий підхід допомагає ефективно використовувати наявний контекст і не тримати в ньому непотрібний код.

Перевагою цього підходу є модульність: модулі кодової бази та індексу не залежать від будь-яких інших модулів, а значить можуть бути замінені на інші, що дозволяє використовувати реалізацію наведеного методу для різних проєктів.

Схематичне зображення модулів та їх залежності подано на рис. 5.

Для оцінки результатів застосування кожного з методів можуть бути використані показники Code Health, що дозволяють дослідити як-

ість коду після рефакторингу [7]. Оцінку ефективності великої мовної моделі можна провести шляхом вирахування показника  $F_1$ , який обчислюють як середнє гармонійне значення точності  $P$  та запам'ятовування  $R$  [8]:

$$F_1 = 2PR / (P + R)$$

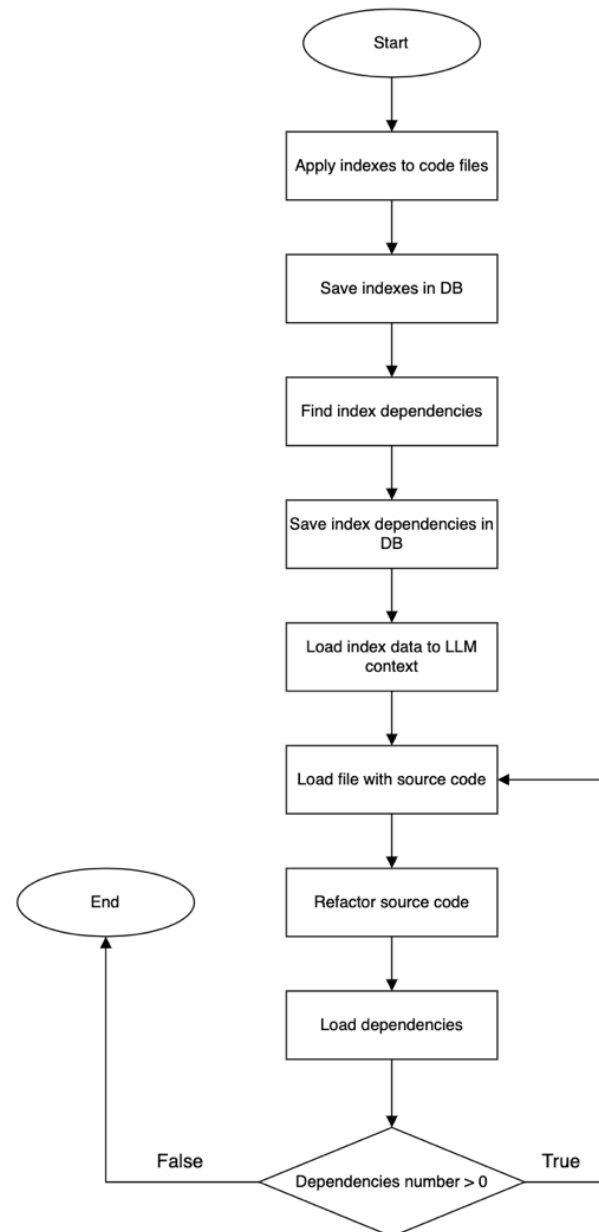


Рис. 5. Схема алгоритму застосування індексації контексту LLM

Fig. 5. Scheme of the algorithm for applying LLM context indexing

На основі проведених досліджень та аналізу результатів рефакторингу з наявними мовними моделями було розроблено методи для поліпшення ефективності LLM. Кожен метод проаналізовано в контексті переваг і недоліків, які можуть вплинути на його реалізацію та застосування. Представлено схеми реалізації запропонованих методів.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано методи поліпшення використання контексту великих мовних моделей для задачі рефакторингу коду програмного забезпечення, які дозволяють поліпшити ефективність рефакторингу із застосуванням великих мовних моделей.

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що цей напрям є перспективним для подальших досліджень, а також корисним із наукової та практичної сторони науковцям та розробникам програмного забезпечення.

### Висновки

Аналіз методу додаткового навчання великої мовної моделі показав, що мовна модель буде відповідати вимогам лише у випадку навчання на достатньому об'ємі даних, який для кожного проєкту є різним. На початкових етапах розробки це ускладнює задачу. Іншим важливим моментом є вибір методу додаткового навчання LLM, що має чималий вплив на кінцевий результат.

Метод поліпшення використання контексту мовної моделі можна застосовувати до проєктів, які мають достатній розмір програмного продукту, щоб не впливати на успішність його застосування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванов О. П., Шинкаренко В. І., Скалозуб В. В., Косолапов А. А. Визначення авторства художнього україномовного тексту засобами штучного інтелекту за надкороткими уривками. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 2 (102). С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/288289>
2. Code Health – How easy is your code to maintain and evolve? *CodeScene*. URL: <https://codescene.io/docs/guides/technical/code-health.html>
3. Critical Problems in Software Development Projects and How to Address Them. *appit*. URL: <https://appitventures.com/blog/8-issues-in-software-development-and-how-to-tackle-them>
4. F1 Score in Machine Learning. *ENCORD*. URL: <https://encord.com/blog/f1-score-in-machine-learning/>
5. Fu Q., Cho M., Merth T., Mehta S., Rastegari M., Najibi M. LazyLLM: Dynamic Token Pruning for Efficient Long Context LLM Inference. *arXiv:2407.14057*. 2024. P. 1–12.
6. Ramesh R., M. A. T. R., Reddy H. V., N. S. V. (2024). Fine-Tuning Large Language Models for Task Specific Data. *2024 2nd International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems (ICNEWS)* (Bangalore, 22-23 Aug. 2024). Bangalore, 2024. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icnews60873.2024.10730913>
7. Refactoring-vs-Refactoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements. *CodeScene*. URL: <https://codescene.com/hubfs/whitepapers/Refactoring-vs-Refactoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements.pdf>
8. Zhang Y., Li Y., Meredith G., Zheng K., Li X. Move method refactoring recommendation based on deep learning and LLM-generated information. *Information Sciences*. 2025. Vol. 697. P. 121753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121753>

О. А. СИРОТА<sup>1\*</sup>, В. М. ГОРЯЧКІН<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 359 60 01, e-mail [sirotaalexandr30@gmail.com](mailto:sirotaalexandr30@gmail.com), ORCID 0000-0001-7391-2471

<sup>2</sup>Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail [vgora@ukr.net](mailto:vgora@ukr.net), ORCID 0000-0002-8952-952X

## Problems of Program Code Refactoring with the Use of Artificial Intelligence

**Purpose.** The modern technological landscape is characterized by the rapid development of software focused on various subject areas and platforms. This leads to the continuous creation of new software products consisting of a huge number of lines of code. The process of developing high-quality software is a multi-stage process that involves a number of factors that affect the final result. The key aspects include the competence of developers, the effectiveness of project management, the availability of necessary resources, and the ability to adapt to changing requirements. Each platform has its own specific features that must be taken into account during development, which further complicates the process of creating universal and effective software solutions. Our research aims to conduct a comprehensive analysis of the potential and promising areas of application of large language models in the context of program code refactoring. The work is aimed at developing and improving methods that will help to increase the efficiency of the refactoring process using these models. **Methodology.** To solve the above problems, it is proposed to implement a set of methods that can be used both separately and in synergy to optimize the final result. These methods, carefully developed in the context of modern software engineering paradigms, are aimed at increasing the efficiency of the refactoring process while ensuring that the software functionality is preserved. Their implementation involves a systematic approach to analyzing and modifying the code base, taking into account both technical aspects and the potential impact on the overall system architecture. **Findings.** A comprehensive analysis of existing language models has been conducted and methods for improving the efficiency of large language models in the context of code refactoring have been developed. The key factors that influence the success of the proposed methods, including the amount of training data and the limitations of the model context, are identified. **Originality.** An approach to improving the efficiency of large language models in code refactoring that takes into account the specifics of different projects and development stages is developed. Innovative methods for retraining language models and optimizing the use of context are proposed, which expand the capabilities of automated refactoring. **Practical value.** The results of the study allow to improve the efficiency of code refactoring using large language models.

**Keywords:** software engineering; artificial intelligence; large language model; refactoring; program code; program code quality

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Ivanov, O. P., Shynkarenko, V. I., Skalozub, V. V., & Kosolapov, A. A. (2023). Determining the Authorship of a Ukrainian-Language Literary Text by Means of Artificial Intelligence from Ultra-Short Excerpts. *Science and Transport Progress*, 2(102), 45-53. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/288289> (in Ukrainian)
2. Code Health - How easy is your code to maintain and evolve? *Codescene* Retrieved from <https://codescene.io/docs/guides/technical/code-health.html> (in English)
3. Critical Problems in Software Development Projects and How to Address Them. *appit*. Retrieved from <https://appitventures.com/blog/8-issues-in-software-development-and-how-to-tackle-them> (in English)
4. F1 Score in Machine Learning. *ENCORD*. Retrieved from <https://encord.com/blog/f1-score-in-machine-learning/> (in English)
5. Fu Q., Cho M., Merth T., Mehta S., Rastegari M., Najibi M. (2024) LazyLLM: Dynamic Token Pruning for Efficient Long Context LLM Inference. *arXiv:2407.14057*, 1-12. (in English)
6. Ramesh, R., M, A. T. R., Reddy, H. V., & N, S. V. (2024, August). Fine-Tuning Large Language Models for Task Specific Data. In *2024 2nd International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems (ICNEWS)* (pp. 1-6). Bangalore, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/icnews60873.2024.10730913> (in English)
7. Refactoring-vs-Refuctoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements. *Codescene*. Retrieved from <https://codescene.com/hubfs/whitepapers/Refactoring-vs-Refuctoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements.pdf> (in English)
8. Zhang, Y., Li, Y., Meredith, G., Zheng, K., & Li, X. (2025). Move method refactoring recommendation based on deep learning and LLM-generated information. *Information Sciences*, 697, 121753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121753> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.11.2024

Прийнята до друку: 28.03.2025

УДК 697.358-047.58

Н. Д. СТЕПАНОВА<sup>1\*</sup>, Д. М. СНИСАРЧУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (063) 063 49 58, ел. пошта Stepanovand@i.ua, ORCID 0000-0002-4654-2062

<sup>2</sup>Каф. теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (098) 312 10 02, ел. пошта snisarchuk1992@gmail.com, ORCID 0009-0000-2497-0392

## Моделювання показників роботи рушникосушарки в низькотемпературній системі створення мікроклімату

**Мета.** У статті передбачено: дослідити умови експлуатації рушникосушарки водяного типу, виготовленої з полірованої нержавіючої сталі AISI 304, у низькотемпературній системі створення мікроклімату; провести порівняльний аналіз заявленої теплової потужності рушникосушарок однакової конструкції від різних виробників, що дозволить виявити суттєві розбіжності між теоретичними та реальними показниками; розглянути методи визначення номінальної теплової потужності рушникосушарки з урахуванням вимушеного руху теплоносія в середині трубопроводу приладу, а також вільного або вимушеного руху повітря поблизу його поверхні. **Методика.** Проаналізовано вплив різних граничних умов на відповідність вимогам чинних нормативних документів щодо оцінки теплової ефективності опалювальних приладів. Для дослідження роботи рушникосушарки використано чисельне моделювання теплових процесів у середовищі SolidWorks Flow Simulation. Оцінено вплив невизначеності коефіцієнта чорноти поверхні рушникосушарки на її теплову ефективність, а також роль швидкості обтікання теплообмінної поверхні повітряними потоками. Установлено, що зниження температури теплоносія суттєво впливає на продуктивність рушникосушарки: зменшення температури теплоносія із 75 до 45 °С призводить до втрати 60–64 % теплової потужності, а зниження до 30 °С – до зменшення потужності на 85,5–87,9 %. **Результати.** Проведено порівняння результатів моделювання теплової потужності рушникосушарки з експериментальними даними, отриманими в сертифікованій лабораторії. Установлено, що результати, отримані за першим методом, корелюються з лабораторними випробуваннями з точністю до 1 %, тоді як другий метод має похибку 5,6 %. Розбіжність між результатами моделювання в SolidWorks Flow Simulation і лабораторними випробуваннями складає 20,23 %, що пов'язано з особливостями розрахункових моделей. **Наукова новизна.** Визначено оптимальні конструктивні характеристики рушникосушарок для використання в низькотемпературних системах, а також запропоновано рекомендації щодо збільшення теплообмінної поверхні рушникосушарок за рахунок оптимізації кількості та довжини горизонтальних елементів. **Практична значимість.** Підвищення достовірності розрахунків теплової потужності рушникосушарок сприятиме поліпшенню їх енергоефективності в сучасних системах тепlopостачання. Отримані результати можуть бути корисними для виробників опалювальних приладів, інженерів-теплотехніків, а також фахівців, що займаються проектуванням і модернізацією систем тепlopостачання житлових і громадських будівель.

**Ключові слова:** низькотемпературна система створення мікроклімату; рушникосушарка; питомий тепловий потік; система тепlopостачання; нержавіюча сталь AISI 304; тепловіддача, вільна конвекція; випромінювання; температура стінки; тепловий граничний шар

### Вступ

Системи створення мікроклімату призначені для підтримання комфортних умов у приміщеннях або виробничих зонах шляхом регулювання параметрів повітряного середовища, таких як температура, вологість, чистота повітря, швидкість повітряних потоків. Застосовують такі системи у приміщеннях різного призна-

чення, у тому числі і житлових. Системи опалення належать до основних видів систем створення мікроклімату і є одним із суттєвих споживачів енергії у житлових приміщеннях. Ванна кімната як ключовий елемент житлового приміщення забезпечує комфортні санітарно-гігієнічні умови, сприяє здоров'ю мешканців та підвищує загальну функціональність і цінність

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

житла. Для підтримання оптимального мікроклімату у ванній кімнаті встановлюють рушникосушарки, які додатково забезпечують комфортне висушування рушників, запобігають утворенню вологи та плісняви. Із набранням чинності [1], рушникосушарки віднесені до складових елементів системи опалення будинку.

У сучасних умовах глобального потепління розвиток систем теплопостачання орієнтований на низькотемпературні системи, оскільки вони відповідають вимогам енергоефективності, екологічної стійкості та зменшення впливу на зміну клімату [2, 6]. Випробування елементів систем опалення згідно з [7] виконують за умов температурного графіка системи на рівні 75 / 65 °C і температури у приміщенні 20 °C. Крім того, більшість виробників рушникосушарок у технічних характеристиках надають інформацію щодо теплової потужності для умов традиційної системи опалення, або за вимогами [8], що не відповідає температурному графіку низькотемпературної системи створення мікроклімату.

### Мета

У роботі передбачено моделювання показників роботи рушникосушарки водяного типу в низькотемпературній системі створення мікроклімату шляхом врахування температурних графіків системи та фактичних умов роботи.

### Методика

Упровадження низькотемпературних систем створення мікроклімату житлових приміщень має ряд переваг, зокрема дозволяє використовувати такі джерела теплоти, як конденсаційні котли, теплові насоси або сонячні колектори, які, у свою чергу, мають більш високий коефіцієнт корисної дії за нижчих температурних графіків. Використання теплових насосів у низькотемпературних системах створення мікроклімату разом із більш високим коефіцієнтом перетворення (COP) дає можливість дотримуватись стратегії декарбонізації процесу виробництва енергії.

На основі порівняння різних типів теплових насосів із позиції їх використання у вищезгаду-

ваних системах у житлових приміщеннях у районі щільної забудови можна виділити низьку переваг теплових насосів типу «повітря–вода». Передусім простота монтажу зумовлена відсутністю необхідності буріння свердловин або проведення великомаштабних земляних робіт. Енергоефективність теплового насоса типу «повітря–вода» залежить від обраного температурного графіка та температури зовнішнього повітря. Ми проаналізували наявні технічні характеристики одного із виробників реверсивних чилерів [4, 10]. Залежність коефіцієнта перетворення від температури навколишнього середовища й обраного температурного графіка показано на рис. 1.

Характеристики реверсивних чилерів двох різних розрахункових потужностей, які подано на рис. 1: 1)  $Q_m = 341$  кВт; 2)  $Q_m = 21,4$  кВт. Робочим холодоагентом у цих чилерах є R410A.

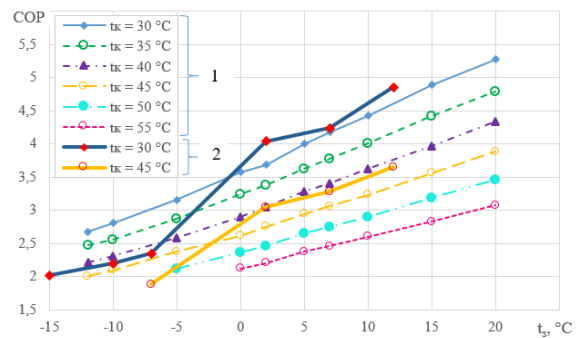


Рис. 1. Вплив температури навколишнього середовища на коефіцієнт перетворення (COP) за різних температур конденсації  $t_k$

Fig. 1. Effect of ambient temperature on the conversion coefficient (CO) at different condensation temperatures  $t_k$

За аналізу рис. 1 можна зробити висновок, що роботу теплового насоса (реверсивного чилера) за температури навколишнього середовища нижче  $-5$  °C виробник регламентує лише за температури в конденсаторі нижче 45 °C, що і відповідає умовам роботи низькотемпературної системи створення мікроклімату.

Зважаючи на низьку температуру теплоносія в системі, можна передбачити, що для забезпечення комфортних умов у приміщенні необхідно буде збільшити поверхню нагріву

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

опалювального приладу, а в нашому випадку – рушникосушарки.

Для моделювання роботи за умов упродовження низькотемпературної системи створення мікроклімату обрано відносно просту модель рушникосушарки водяного типу [3], що має такі геометричні характеристики: міжосьова відстань для під'єднання 500 мм, діаметр під'єднання  $G \frac{1}{2}''$ , висота стояків  $H = 800$  мм, повна ширина теплообмінної поверхні  $L = 530$  мм, глибина без кріплення  $B = 82$  мм. Конструктивно рушникосушарка виконана з двох стояків із шести перемичок. Для виготовлення її використано нержавіючу сталь AISI 304 [11].

Ця рушникосушарка пройшла випробування в сертифікованій лабораторії HEATEST, s.r.o. (Výkev, Czech Republic) за умов: температура прямої мережної води на вході в рушникосушарку  $\tau_1 = 74,33$  (52,34) °C; на виході –  $\tau_2 = 64,22$  (46,98) °C; температура навколишнього середовища  $t_{nc} = 20,18$  (20,11) °C; витрата грійної води  $G_{th} = 0,00306$  (0,00307) кг/с.

У подальших дослідженнях буде розглянуто варіант нижнього під'єднання рушникосушарки до водяної системи тепlopостачання. Температура прямої мережної води  $\tau_1$  змінюватиметься в межах від 75 до 30 °C кроком у 5 °C.

Для дослідження показників роботи рушникосушарки розроблено математичну модель теплогідродинамічних процесів у ній, яка описує такі процеси теплопередачі:

- вимушена конвекція (ламінарна течія) під час руху грійної води у стояках і перемичках;
- теплопровідність через циліндричну стінку;
- вільна конвекція повітря біля вертикальних стояків;
- вільна конвекція під час обтікання ряду горизонтальних труб;
- випромінювання з нагрітої поверхні рушникосушарки.

Під час моделювання теплогідродинамічних процесів було розглянуто два підходи щодо визначення коефіцієнтів тепловіддачі за вільної та вимушеної конвекції, оскільки процес тепловіддачі є складним і залежить від багатьох фак-

торів [5, 8], тому важливим питанням є визначення граничних умов.

Згідно з першим підходом, число Нуссельта за вимушеної конвекції під час руху рідини у гладких трубах становитиме:

$$\overline{Nu}_{dp} = 1,4 \cdot (Re_{dp} \cdot d/l)^{0,4} \cdot Pr_p^{0,33} \cdot (Pr_p / Pr_{cm})^{0,25}, \quad (1)$$

де  $Re_{dp} = w \cdot d / \nu$  – критерій Рейнольдса;  $w$  – середня швидкість теплоносія в елементі, м/с;  $\nu$  – в'язкість теплоносія за середньої температури;  $d$  – внутрішній діаметр елемента рушникосушарки (стояка або перемички);  $l$  – внутрішній діаметр елемента рушникосушарки (стояка або перемички);  $Pr_p$  – число Прандтля для рідини;  $Pr_{cm}$  – число Прандтля для рідини за температури стінки.

Залежність (1) використовують для ламінарної течії за умови  $l/d > 10$ ,  $Re_{dp} > 10$  і визначальної температури – середньої температури води в рушникосушарці  $(\tau_1 + \tau_2)/2$ .

Для вільної конвекції за першим підходом використано залежності:

для вертикальних елементів рушникосушарки (стояків), за умови  $Gr_{lp} \cdot Pr_p > 10^9$ :

$$\overline{Nu}_{lp} = 0,15 \cdot (Gr_{lp} \cdot Pr_p)^{0,33} \cdot (Pr_p / Pr_{cr})^{0,25}; \quad (2)$$

за умови  $Gr_{lp} \cdot Pr_p < 10^9$ :

$$\overline{Nu}_{lp} = 0,76 \cdot (Gr_{lp} \cdot Pr_p)^{0,25} \cdot (Pr_p / Pr_{cm})^{0,25}; \quad (3)$$

– для горизонтальних елементів рушникосушарки (перемичок), за умови  $10^3 < Gr_{dp} \cdot Pr_p < 10^8$ :

$$\overline{Nu}_{dp} = 0,5 \cdot (Gr_{dp} \cdot Pr_p)^{0,25} \cdot (Pr_p / Pr_{cm})^{0,25}; \quad (4)$$

де  $Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3 / (\nu^2)$  – критерій Грасгофа;  $\beta$  – температурне розширення теплоносія за середньої температури,  $K^{-1}$ ;  $\Delta t$  – середня різниця температур між теплоносієм та стінкою в елементах, К.

Теплофізичні властивості повітря в рівняннях (2) – (4) взято за температурою повітря

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

далеко від стінки, тобто за температурою навколишнього середовища  $t_{nc}$ .

Другий підхід враховує, що число Нуссельта за вимушеної конвекції під час руху рідини в гладких трубах [5] за ламінарної течії й умови  $q_s = \text{const}$ , не залежить від чисел  $Re_{dp}$  і  $Pr_p$  і дорівнює  $\overline{Nu}_{dp} = 4,36$ .

Для вільної конвекції за другим підходом використано залежності [13]:

– для вертикальних елементів рушникосушарки (стояків), за умови  $10^9 < Gr_{lp} \cdot Pr_p < 10^{13}$ :

$$\overline{Nu}_{lp} = \left\{ \frac{0,825 + 0,387 \cdot (Gr_{lp} \cdot Pr_p)^{1/6}}{[1 + (0,492 \cdot Pr_p)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2; \quad (5)$$

за умови  $Gr_{lp} \cdot Pr_p < 10^9$ :

$$\overline{Nu}_{lp} = 0,68 + 0,67 \cdot (Gr_{lp} \cdot Pr_p)^{1/4} / [1 + (0,492 \cdot Pr_p)^{9/16}]^{4/9}; \quad (6)$$

– для горизонтальних елементів рушникосушарки (перемичок), за умови  $10^2 < Gr_{dp} \cdot Pr_p < 10^4$ :

$$\overline{Nu}_{dp} = 0,85 \cdot (Gr_{dp} \cdot Pr_p)^{0,188}; \quad (7)$$

за умови  $10^4 < Gr_{dp} \cdot Pr_p < 10^7$ :

$$\overline{Nu}_{dp} = 0,48 \cdot (Gr_{dp} \cdot Pr_p)^{0,25}. \quad (8)$$

Визначальною температурою у рівняннях (5) – (8) є середня температура теплового граничного шару  $t = (t_{nc} + t_{ct})/2$ .

Визначення коефіцієнта тепловіддачі випроміненням залежить від температури нагрітої стінки, температури навколишнього середовища та ступеня чорноти поверхні рушникосушарки  $\varepsilon$ , який згідно з [12–14] для полірованої нержавіючої сталі становить  $\varepsilon = 0,075 \dots 0,16$ . Під час моделювання взято  $\varepsilon = 0,0919$  згідно із [14].

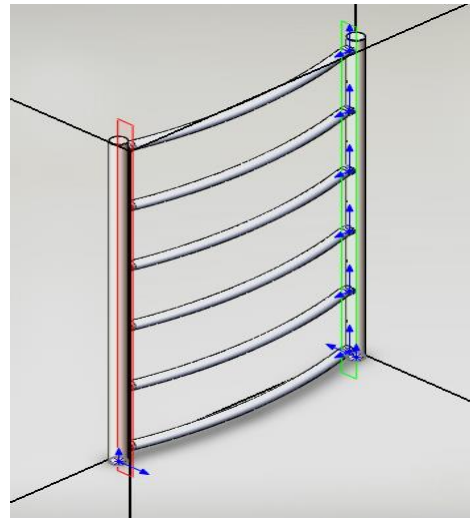


Рис. 2. Модель рушникосушарки у SolidWorks

Fig. 2. Model of a towel dryer in SolidWorks

Під час визначення швидкості теплоносія в елементах рушникосушарки взято рівномірний його розподіл по горизонтальних елементах.

Окрім математичного моделювання тепло-масообмінних процесів у рушникосушарці, було проведено моделювання теплопередачі в рушникосушарці за допомогою програмного модуля SolidWorks Flow Simulation. Дослідження виконано на розробленій моделі рушникосушарки [7] (рис. 2).

Узято такі граничні умови:  $G_{th} = 0,00306$  кг/с;  $\tau_1 = 75$  °С;  $\tau_2 = 65$  °С;  $t_{nc} = 20$  °С; тиск на вихідній грані рушникосушарки  $P_2 = 3$  бар. Матеріалом елементів рушникосушарки обрано нержавіючу сталь AISI 304, що має поліровану зовнішню поверхню. Розв'язано зовнішню задачу. Поставлено головні цілі: температура стінки та повітря і тепла потужність.

Як видно з рис. 2, результати моделювання за першим підходом добре корелюються з результатами випробувань у сертифікованій лабораторії (точність у межах 1 %), тоді як за другим підходом розбіжність досягає 5,6 %. Розбіжність між результатами моделювання в SolidWorks Flow Simulation і результатами лабораторії складає 20,23 %, що також є добрим результатом.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## Результати

Результати моделювання теплової потужності рушникосушарки за вищенаведеними підходами показано на рис. 3.

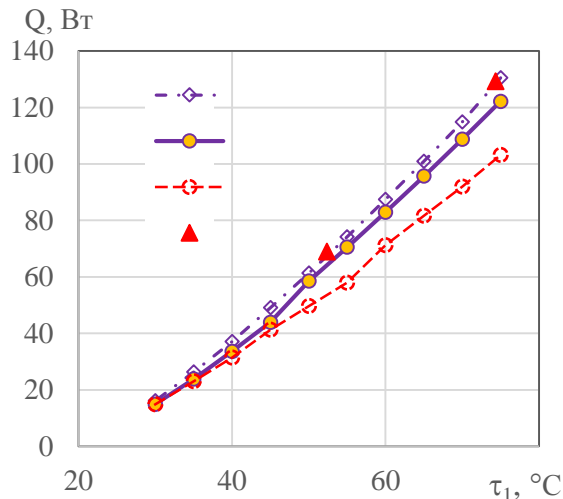


Рис. 3. Результати визначення теплової потужності рушникосушарки:

1 – підхід 1; 2 – підхід 2; 3 – дослідження в SolidWorks Flow Simulation; 4 – результати випробувань у сертифікованій лабораторії HEATEST, s.r.o. (Býkev, Czech Republic)

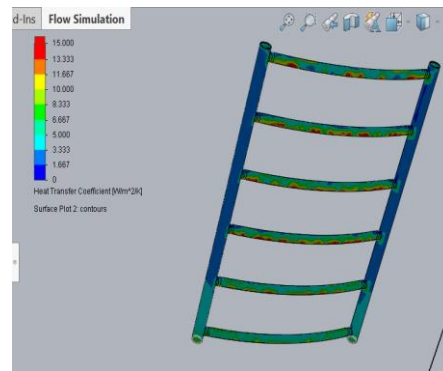
Fig. 3. Results of determining the thermal power of a towel dryer:

1 – approach 1; 2 – approach 2; 3 – study in SolidWorks Flow Simulation; 4 – test results in the certified laboratory HEATEST, s.r.o. (Býkev, Czech Republic)

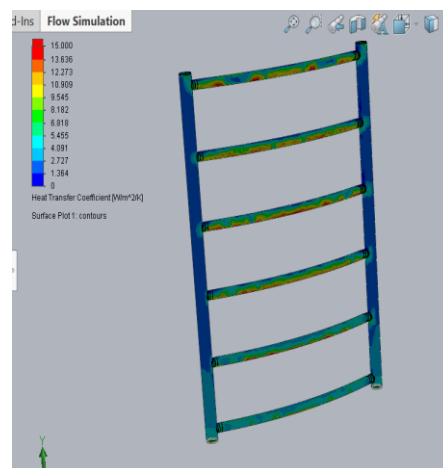
Якщо оцінити вплив коефіцієнта тепловіддачі випроміненням у сумарному коефіцієнті тепловіддачі від стінки рушникосушарки до навколишнього середовища, то для першого підходу він складає 6,8–13,1 % (менша цифра відповідає більшій температурі теплоносія на вході в рушникосушарку), а для другого – 7,1–18,1 % відповідно. Тому додатково проаналізовано вплив значення  $\varepsilon$  на теплову потужність рушникосушарки ( $Q$ ). Так, під час зміни  $\varepsilon = 0,0919$  на  $\varepsilon = 0,16$  [14] величина  $Q$ , визначена за першим підходом, зросла на 4,66 – 6,32 %, а визначена за другим підходом – на 5,24 – 7,34 %. Водночас у програмному продукті SolidWorks Flow Simulation значення  $\varepsilon$  прив'язане до обраного матеріалу рушникосушарки і складає 0,074. На нашу думку, це може

пояснити наведену вище розбіжність у значеннях теплової потужності рушникосушарки.

Із рис. 3 видно, що теплова потужність рушникосушарки зі зменшенням температури грійного теплоносія на вході, тобто під час переходу на низькотемпературну систему створення мікроклімату, суттєво зменшується. Так, зменшення з  $\tau_1 = 75$  °C до  $\tau_1 = 45$  °C спричиняє зменшення теплової потужності (за сталої витрати теплоносія) на 60–64 %, а до  $\tau_1 = 30$  °C – на 85,5–87,9 % залежно від обраного підходу до моделювання. Зменшення температури прямої мережної води однозначно спричиняє й одночасне зменшення середньологарифмічного температурного напору з 49,7–50,8 °C (за  $\tau_1 = 75$  °C) до 23,02–23,34 °C (за  $\tau_1 = 45$  °C) або до 9,36 – 9,4 °C (за  $\tau_1 = 30$  °C).



$\tau_1 = 45$  °C



$\tau_1 = 30$  °C

Рис. 4. Коефіцієнт теплопередачі рушникосушарки

Fig. 4. The heat transfer coefficient of towel dryers

### Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, для забезпечення комфортних умов у приміщенні ванної кімнати необхідно значно збільшувати поверхню нагріву рушникосушарки. Оцінити цю величину можна шляхом проведення додаткових досліджень.

Моделювання роботи рушникосушарки в SolidWorks Flow Simulation дозволяє оцінити коефіцієнти теплопередачі різних елементів (див. рис. 4.). Як видно з рис. 4, коефіцієнти теплопередачі горизонтальних елементів суттєво перевищують коефіцієнти теплопередачі вертикальних елементів, тому збільшувати поверхню нагріву рушникосушарки подібної конструкції більш доцільно за рахунок збільшення довжини й кількості горизонтальних елементів.

### Висновки

Обґрунтовано доцільність упровадження низькотемпературних систем створення мікроклімату в житлових приміщеннях. Доведено доцільність застосування теплових насосів типу «повітря–вода» для житлових будинків у районах щільної забудови у зв'язку із їх вищою ефективністю в низькотемпературних режимах і відносною простотою монтажу. Проаналізовано технічні характеристики теплових насосів (реверсивних чилерів) і встановлено, що використання цих машин із низькотемпературним графіком призводить до збільшення їх коефіцієнта перетворення COP, тобто до підвищення енергоефективності. Установлено найбільш доцільний графік температур прямої мережної води для температур навколишнього середовища нижче ніж  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що складає не вище ніж  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Розглянуто теплогідродинамічні процеси, що відбуваються в рушникосушарці, та побудовано її математичну модель на основі двох

підходів щодо визначення граничних умов теплообміну. Наведено граничні умови для моделювання теплопередачі в рушникосушарці за допомогою програмного модуля SolidWorks Flow Simulation.

У результаті проведеного моделювання встановлено, що результати, отримані за першим підходом (визначальна температура в разі вільної конвекції – температурою повітря далеко від стінки), з точністю до 1 % описують результати, отримані в сертифікованій лабораторії HEATEST. Другий підхід дає похибку з результатами випробувань на рівні 5,6 %. Моделювання в SolidWorks Flow Simulation відмінне від результатів лабораторії на 20,23 %.

Установлено, що вибір відповідного ступеня чорноти поверхні рушникосушарки  $\epsilon$  може призвести до розбіжності в результатах 4,66–7,34 % за зміни  $\epsilon = 0,0919$  на  $\epsilon = 0,16$ .

З'ясовано, що зі зменшенням температури грійного теплоносія, тобто в разі переходу на низькотемпературну систему створення мікроклімату, теплова потужність рушникосушарки зменшується на 60–64 % і на 85,5–87,9 % за зміни від  $\tau_1 = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $\tau_1 = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $\tau_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно. Це можна пояснити, як мінімум, суттєвим зменшенням середньологарифмічного температурного напору із 49,7–50,8  $^{\circ}\text{C}$  (за  $\tau_1 = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) до 23,02–23,34  $^{\circ}\text{C}$  (за  $\tau_1 = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) або до 9,36–9,4  $^{\circ}\text{C}$  (за  $\tau_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

За результатами моделювання в SolidWorks Flow Simulation встановлено, що коефіцієнти теплопередачі горизонтальних елементів рушникосушарок значно перевищують відповідні коефіцієнти вертикальних елементів. Отже, збільшити поверхню нагріву рушникосушарки з метою підтримання оптимальних параметрів мікроклімату доцільно за рахунок збільшення кількості і довжини горизонтальних її елементів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-64:2012 *Внутрішній водопровід та каналізація. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво* [Чинний від 2013-03-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 105 с.
2. Снісарчук Д. М., Степанова Н. Д. Доцільність впровадження низькотемпературних систем створення мікроклімату будівель. *Матеріали ЛІІІ Науково-технічної конференції факультету будівництва, цивіль-*

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- льної та екологічної інженерії ВНТУ (Вінниця, 20–22 бер. 2024 р.). Вінниця : ВНТУ, 2024. С. 1–3.
3. *СТАЛЬ AISI 304*. URL: <https://westa.kiev.ua/ua/standarty/marki-stali/stal-aisi-304>
  4. Ткаченко С., Степанова Н., Степанов Д., Степанов О. Рушникосушарка як елемент сучасної системи теплопостачання. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. Т. 30, № 1. С. 132–139. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-1-132-139>
  5. *Benefits of Low-temperature Heating Systems*. URL: <https://www.heatgeek.com/benefits-of-low-temperature-heating-systems/>
  6. *DIN EN 442-2:2015 Radiators and convectors - Part 2: Test methods and rating* [Effective Date 01-03-2015]. German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2015. 81 p.
  7. Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Danvers : John Wiley & Sons, Inc, 2011. 997 p.
  8. Inverter Air-Cooled Liquid chillers & Reversible Air to Water Heat Pumps. *Ereba 17-21*. URL: [https://www.hosbv.com/data/specifications/14389\\_CIAIAT%207449145%20-%20EREBA%2017%20HT.pdf](https://www.hosbv.com/data/specifications/14389_CIAIAT%207449145%20-%20EREBA%2017%20HT.pdf)
  9. Kapjor A., Durcansky P., Vantuch M. Effect of Heat Source Placement on Natural Convection from Cylindrical Surfaces. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13174334>
  10. Saari J. *Heat exchanger dimensioning*. Lappeenranta university of technology, 2019. 101 p.
  11. *Surface Emissivity Coefficients*. URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
  12. *Table of emissivity of various surfaces*. URL: [https://www.transmetra.ch/images/transmetra\\_pdf/publikationen\\_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity\\_table.pdf](https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity_table.pdf)
  13. Water chillers. Heat pumps. *AQUACIAT POWER*. URL: <https://surl.li/flhjgk>
  14. Woods S. I., Jung T. M., Sears D. R., Yu J. Emissivity of silver and stainless steel from 80 K to 300 K: Application to ITER thermal shields. *Cryogenics*. 2014. Vol. 60. P. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.01.002>

N. D. STEPANOVA<sup>1\*</sup>, D. M. SNISARCHUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. Heat Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske Shose, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (063) 063 49 58, e-mail [Stepanovand@i.ua](mailto:Stepanovand@i.ua), ORCID 0000-0002-4654-2062

<sup>2</sup>Dep. Heat Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske Shose, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (098) 312 10 02, e-mail [snisarchuk1992@gmail.com](mailto:snisarchuk1992@gmail.com), ORCID 0009-0000-2497-0392

## Modeling the Performance of a Towel Dryer in a Low-Temperature Microclimate System

**Purpose.** The article is aimed at: investigating the operating conditions of a water-type towel dryer made of polished stainless steel AISI 304 in a low-temperature microclimate system; conducting a comparative analysis of the declared thermal power of towel dryers of the same design from different manufacturers, which will reveal significant differences between theoretical and real indicators; considering methods for determining the rated thermal power of a towel dryer, taking into account the forced movement of the coolant in the middle of the device pipeline, and so on. **Methodology.** The influence of various boundary conditions on compliance with the requirements of current regulatory documents for assessing the thermal efficiency of heating devices is analyzed. Numerical modeling of thermal processes in the SolidWorks Flow Simulation environment was used to study the operation of a towel dryer. The influence of the uncertainty of the blackness coefficient of the towel dryer surface on its thermal efficiency, as well as the role of the speed of air flow around the heat exchange surface, was evaluated. It was found that a decrease in the coolant temperature significantly affects the performance of the towel dryer: a decrease in the coolant temperature from 75 to 45 °C leads to a loss of 60–64 % of the heat output, and a decrease to 30 °C leads to a decrease in the output by 85.5–87.9 %. **Findings.** The results of modeling the thermal power of a towel dryer were compared with experimental data obtained in a certified laboratory. It was found that the results obtained by the first method correlate with laboratory tests to within 1 %, while the second method has an error of 5.6 %. The discrepan-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

cy between the results of modeling in SolidWorks Flow Simulation and laboratory tests is 20.23 %, which is due to the peculiarities of the computational models. **Originality.** The optimal design characteristics of heated towel rails for use in low-temperature systems have been determined, and recommendations for increasing the heat exchange surface of heated towel rails by optimizing the number and length of horizontal elements have been proposed. **Practical value.** Improving the reliability of calculations of the thermal capacity of towel dryers will help to improve their energy efficiency in modern heat supply systems. The results obtained can be useful for manufacturers of heating devices, heating engineers, as well as specialists involved in the design and modernization of heat supply systems for residential and public buildings.

*Keywords:* low-temperature microclimate system; towel dryer; specific heat flux; heat supply system; stainless steel AISI 304; heat transfer, free convection; radiation; wall temperature; thermal boundary layer

## REFERENCES

1. *Vnutrishnii vodoprovod ta kanalizatsiia. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo, 105 DBN V.2.5-64:2012.* (2013). Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. (in Ukrainian)
2. Snisarchuk, D. M., & Stepanova, N. D. (2024, March). Dotsilnist vprovadzhennia nyzkotemperaturnykh system stvorennia mikroklimatu budivel. In *Materialy LIII Naukovo-tekhnichnoi konferentsii fakultetu budivnytstva, tsyvilnoi ta ekolohichnoi inzhenerii VNTU* (pp. 1-3). Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
3. *Stal AISI 304.* Retrieved from <https://westa.kiev.ua/ua/standarty/marki-stali/stal-aisi-304> (in Ukrainian)
4. Tkachenko, S., Stepanova, N., Stepanov, D., & Stepanov, O. (2021). Towel dryer as an element of the modern heat supply system. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 30(1), 132-139. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-1-132-139> (in Ukrainian)
5. *Benefits of Low-temperature Heating Systems.* Retrieved from <https://www.heatgeek.com/benefits-of-low-temperature-heating-systems/> (in English)
6. *Radiators and convectors - Part 2: Test methods and rating, 81 DIN EN 442-2:2015.* (2015). German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung). (in English)
7. Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* Danvers: John Wiley & Sons, Inc. (in English)
8. Inverter Air-Cooled Liquid Chillers & Reversible Air to Water Heat Pumps. *Ereba 17-21.* Retrieved from [https://www.hosbv.com/data/specifications/14389\\_CIAT%207449145%20-%20EREBA%2017%20HT.pdf](https://www.hosbv.com/data/specifications/14389_CIAT%207449145%20-%20EREBA%2017%20HT.pdf) (in English)
9. Kapjor, A., Durcansky, P., & Vantuch, M. (2020). Effect of Heat Source Placement on Natural Convection from Cylindrical Surfaces. *Energies*, 13(17), 4334. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13174334> (in English)
10. Saari J. (2019). *Heat Exchanger Dimensioning.* Lappeenranta University of Technology. (in English)
11. *Surface Emissivity Coefficients.* Retrieved from [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html) (in English)
12. *Table of Emissivity of Various Surfaces.* Retrieved from [https://www.transmetra.ch/images/transmetra\\_pdf/publikationen\\_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity\\_table.pdf](https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity_table.pdf) (in English)
13. Water Chillers. Heat Pumps. *AQUACIAT POWER.* Retrieved from <https://surl.li/flhjgk> (in English)
14. Woods, S. I., Jung, T. M., Sears, D. R., & Yu, J. (2014). Emissivity of silver and stainless steel from 80K to 300K: Application to ITER thermal shields. *Cryogenics*, 60, 44-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.01.002> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.11.2024

Прийнята до друку: 25.03.2025

# МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.867.1-047.37

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

<sup>1</sup>\*Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, 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

## Дослідження впливу проєктних параметрів скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою на його технічні характеристики

**Мета.** Дослідження спрямовано на: визначення характеру впливу проєктних параметрів на технічні характеристики скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою (ширину, висоту жолоба та потужність приводу); побудову аналітичних залежностей зазначених величин від проєктних характеристик: типу та фізико-механічних властивостей вантажу, довжини транспортування, продуктивності, кута нахилу траси; проведення графічного аналізу характеру впливу. **Методика.** Для досягнення мети використано алгоритми розрахунків, представлені в сучасній технічній літературі, проведено аналіз факторів і величин, які впливають на значення потужності приводу та геометричних параметрів жолоба конвеєра. Установлено, що для визначення потужності приводу вібраційних конвеєрів необхідно провести детальний розрахунок, який містить: ширину та висоту жолоба, крок розміщення та висоту скребоків, зусилля в характерних точках траси за методом обходу по контуру, опір переміщенню вантажу. **Результати.** Для скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою, призначеного для транспортування несортваного вугілля, проведено графічний аналіз впливу довжини транспортування, кута нахилу траси, продуктивності на величину потужності приводу та геометричні розміри жолоба. Установлено, що функція зміни величини ширини жолоба конвеєра від продуктивності є зростаючою (за фіксованих інших параметрів), а від кута нахилу – ступінчастою зростаючою; функція зміни величини потужності приводу від продуктивності та довжини транспортування – лінійною зростаючою, від кута нахилу траси – нелінійною зростаючою. **Наукова новизна.** Автори вперше виконали дослідження залежності потужності приводу та ширини жолоба скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою, побудували аналітичні залежності технічних характеристик (потужності приводу, ширини та висоти жолоба) від проєктних параметрів: продуктивності, довжини транспортування, типу та фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу, кута нахилу траси. Для конвеєра, що транспортує несортване вугілля, побудовано графічні залежності ширини жолоба та потужності приводу від величини продуктивності, довжини транспортування та кута нахилу траси. **Практична значимість.** Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер зміни вищезазначених технічних характеристик у разі варіювання проєктних параметрів, таких як продуктивність, довжина конвеєра, кут його нахилу. Запропоновані залежності можуть бути використані для швидкого визначення раціональної потужності приводу конвеєра за конкретних проєктних даних.

*Ключові слова:* скребковий конвеєр; продуктивність; потужність; привід

### Вступ

До скребкових конвеєрів належать різноманітні за конструкцією транспортувальні машини, у яких вантаж переміщується волочінням по

нерухомому відкритому або закритому жолобу чи по трубі прямокутного або круглого перетину за допомогою рухомих скребоків, прикріплених до тягового елемента. Скребкові конвеєри застосовують для транспортування пилоподібних, зернистих і крупнокускових сипких ван-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

тажів, а також для охолодження гарячих вантажів: золи, шлаку та ін.

Отже, скребкові конвеєри знайшли широке застосування у вугільних шахтах, на збагачувальних фабриках, на підприємствах хімічної і харчової промисловості, у тваринницьких комплексах.

Крім того, скребкові конвеєри можуть бути складовими спеціальних машин – навантажувачів. Для зачерпування насипного вантажу способом верхнього захоплення в таких машинах використовують скребкові навантажувачі, у яких робочим органом є короткий скребковий конвеєр. Насипний вантаж нагрібають скребками на стрічковий конвеєр для завантаження автомобілів-самоскидів, як зображено на рис. 1.

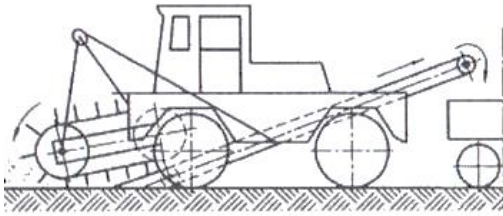


Рис. 1. Скребковий навантажувач

Fig. 1. Scraper loader

Основними публікаціями, які описують будову, конструктивні особливості, експлуатаційні та розрахункові параметри сучасних машин безперервного транспорту, у тому числі скребкових конвеєрів різних типів, є [1, 4–11, 13, 14]. Аналіз публікацій показує, що для визначення потужності приводу скребкових конвеєрів необхідно провести детальний розрахунок, який містить: ширину та висоту жолоба, крок розміщення та висоту скребків, зусилля в характерних точках траси методом обходу по контуру, опір переміщенню вантажу. Порядок проведення таких розрахунків детально описано в літературі, зокрема в роботах [4, 5, 7]. Крім того, у деяких роботах побудовані скорочені алгоритми розрахунку величини потужності приводу та геометричних розмірів вантажонесних елементів машин безперервного транспорту, зокрема, у роботі [12] автори побудували аналітичні залежності потужності приводу пневмотранспортних установок. У роботі [2] проведено дослідження залежності величин потужності приводу та геометричних розмірів труби вібраційного конвеєра за заданих проектних характеристик. Робота [3] присвячена аналізу впливу

параметрів експлуатації машин на технічні характеристики елеватора в пункті чищення та миття парку техніки.

### Мета

Основною метою роботи є дослідження впливу проектних даних на технічні характеристики скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою, зокрема геометричні параметри жолоба та потужність приводу, побудова аналітичних та графічних залежностей зазначених величин від проектних характеристик: типу та фізико-механічних властивостей вантажу, довжини та кута нахилу траси транспортування, продуктивності.

### Методика

Вихідними даними для проектного розрахунку конвеєра розглянутої конструкції є такі: фізико-механічні властивості транспортованого матеріалу (щільність  $\rho_p$ , т/м<sup>3</sup>; максимальний розмір куска  $a_{\max}$ , мм; коефіцієнт тертя вантажу по жолобу  $f$ ); продуктивність конвеєра  $\Pi$ , т/год; довжина конвеєра  $L$ , м; кут нахилу конвеєра  $\beta$ ; коефіцієнти опору руху  $\omega'_b$ .

Розрахункова схема скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою зображена на рис. 2.

Використаємо для розрахунків методику, викладену в [4].

Для подальшого дослідження визначимо основні групи компонент загального розрахунку скребкового конвеєра, які залежать від проектних параметрів конвеєра: параметри жолоба (ширина та висота), параметри скребків (висота та крок розміщення), лінійні навантаження на ланцюги, зусилля в характерних точках траси, опори руху та потужність приводу конвеєра.

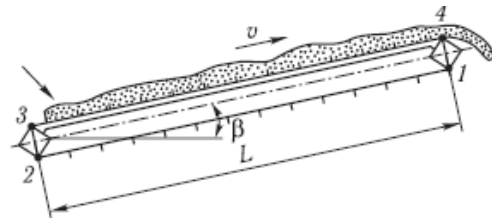


Рис. 2. Розрахункова схема скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою

Fig. 2. Design scheme of a scraper conveyor with an upper working branch

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Продуктивність скребкового конвеєра, т/год:

$$\Pi = 3600 A v_p = 3600 B h \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p, \quad (1)$$

де  $B$  і  $h$  – відповідно ширина і висота жолоба, м;  $\psi_{\text{жс}}$  – коефіцієнт заповнення жолоба:  $\psi_{\text{жс}} = 0,5 \dots 0,6$  – для легкосипких вантажів,  $\psi_{\text{жс}} = 0,7 \dots 0,8$  – для кускових вантажів;  $k_{\beta} = 1$  – коефіцієнт, що враховує кут нахилу конвеєра  $\beta$  (табл. 8.13 [4]).

Для скребкових конвеєрів беруть  $\frac{B}{h} = 2,4 \dots 4,0$ .

З урахуванням цього відношення із формули (1) визначаємо ширину жолоба:

$$B = \sqrt{\frac{(2,4 \dots 4,0) \Pi}{3600 \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p}}, \quad (2)$$

$\psi_{\text{жс}} = 0,75$  – для кускового рядового вугілля.

Швидкість руху ланцюгів  $v$  у скребкових конвеєрах обирають у межах  $0,1 \dots 10$  м/с.

Висота жолоба становитиме:

$$h = \frac{B}{(2,4 \dots 4,0)}. \quad (3)$$

Підставляючи (2) в (3), маємо:

$$h = \sqrt{\frac{\Pi}{(2,4 \dots 4,0) \cdot 3600 \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p}}. \quad (4)$$

Висоту скребка визначаємо так:

$$h_c = h + (25 \dots 50). \quad (5)$$

Підставляючи (4) в (5), маємо:

$$h_c = \sqrt{\frac{\Pi}{(2,4 \dots 4,0) \cdot 3600 \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p}} + (25 \dots 50). \quad (6)$$

Крок скребків становитиме:

$$t_c = (2 \dots 4) h_c. \quad (7)$$

Підставляючи (6) у (7), маємо:

$$t_c = (2 \dots 4) \left[ \sqrt{\frac{\Pi}{(2,4 \dots 4,0) \cdot 3600 \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p}} + (25 \dots 50) \right]. \quad (8)$$

Крок скребків і ширина жолоба мають задовольняти умови:

$$t_c \geq 1,5 a_{\text{max}}; \quad (9)$$

$$B \geq k_c a_{\text{max}}. \quad (10)$$

Використовуючи умови (9)–(10), маємо залежності:

$$(2 \dots 4) \left[ \sqrt{\frac{\Pi}{(2,4 \dots 4,0) \cdot 3600 \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p}} + (25 \dots 50) \right] \geq 1,5 a_{\text{max}}; \quad (11)$$

$$\sqrt{\frac{\Pi}{(2,4 \dots 4,0) \cdot 3600 \psi_{\text{жс}} k_{\beta} v p_p}} \geq k_c a_{\text{max}}, \quad (12)$$

де  $k_c$  – дослідний коефіцієнт (табл. 8.14 [4]).

Лінійне навантаження від транспортованого вантажу становитиме:

$$q = \frac{\Pi g}{3,6 v}. \quad (13)$$

Лінійну вагу ланцюгів і скребків визначаємо так:

$$q_{\text{л}} = k_{\text{л}} q, \quad (14)$$

де  $k_{\text{л}}$  – емпіричний коефіцієнт: для одноланцюгових конвеєрів  $k_{\text{л}} = 0,5 \dots 0,6$ , для дволанцюгових –  $0,6 \dots 0,8$ . Обираємо дволанцюговий скребковий конвеєр, для якого  $k_{\text{л}} = 0,715$ .

Підставляючи (13) у (14), маємо:

$$q_{\text{л}} = k_{\text{л}} \frac{\Pi g}{3,6 v}. \quad (15)$$

Натяги ланцюгів та опір рухові тягового органа визначають за методом обходу по контуру. Мінімальний натяг ланцюгів у точці 1 (рис. 2) задаємо через умову правильної взаємодії їх з ведучими зірочками; практично  $S_1 = 1000 \dots 3000$  Н. Для конвеєра з високими скребками беремо  $S_{\text{min}} = S_1 = 3000$  Н.

Натяг ланцюга в точці 2 становитиме:

$$S_2 = S_1 + q_{\text{л}} L \cos \beta \omega_{\text{л}}' - q_{\text{л}} L \sin \beta, \quad (16)$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

де  $\omega'_l$  – коефіцієнт опору рухові ланцюгів: для ланцюгів із ходовими котками на підшипниках ковзання  $\omega'_l = 0,10 \dots 0,13$ , для ланцюгів без котків, коли вантаж рухається по жолобу,  $\omega'_l = 0,25 \dots 0,5$  (беремо  $\omega'_l = 0,35$ ).

Натяг ланцюгів у точці 3 буде дорівнювати:

$$S_3 = kS_2, \quad (17)$$

де  $k = 1,1$  – коефіцієнт збільшення натягу ланцюгів у процесі обертання зірочки.

Підставляючи (16) в (17), маємо:

$$S_3 = k(S_1 + q_l L \cos \beta \omega'_l - q_l L \sin \beta). \quad (18)$$

Крім того, для конвеєра з високими скребками натяг ланцюгів у точці найменшого натягу робочої гілки (точка 3) перевіряємо на стійкість скребка, яка має задовольняти умову:

$$S_3 \geq S_{3\min} = \frac{Wh_1}{t_l} \text{ctg} \varepsilon, \quad (19)$$

де  $W$  – опір переміщенню порцій вантажу між скребками:

$$W = qt_c \cos \beta \omega'_b + qt_c \sin \beta, \quad (20)$$

тут  $h_1$  – відстань по висоті скребка від сили  $W$  до ланки ланцюга (лінії, яка проходить шарніри ланцюга): приблизно  $h_1 = \frac{1}{2}h = \frac{1}{2}200 = 100$  мм;  $t_l$  – крок ланцюга, мм;  $\varepsilon$  – кут відхилення ланки ланцюга (обираємо  $\varepsilon \leq 2 \dots 3^\circ$ ).

Підставляючи (20) у (19), маємо:

$$S_3 \geq S_{3\min} = \frac{(qt_0 \cos \beta \omega'_b + qt_0 \sin \beta)h_1}{t_l} \text{ctg} \varepsilon. \quad (21)$$

Якщо умова витримана, то можна продовжувати розрахунок.

Натяг ланцюгів у точці 4 становитиме:

$$S_4 = S_3 + q_l L \cos \beta \omega'_l + qL \cos \beta \omega'_b + (q_l + q)L \sin \beta, \quad (22)$$

де  $\omega'_b$  – коефіцієнт опору рухові вантажу по жолобу. У загальному випадку  $\omega'_b = 1,1f$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя матеріалу об жолоб.

Для ящиків конвеєрів (з боковими рухомими стінками)  $\omega'_b = f$ ; у разі переміщення вугілля  $\omega'_b = 0,45 \dots 0,66$ .

Підставляючи (18) у (22), маємо:

$$S_4 = k(S_1 + q_l L \cos \beta \omega'_l - q_l L \sin \beta) + q_l L \cos \beta \omega'_l + qL \cos \beta \omega'_b + (q_l + q)L \sin \beta = kS_1 + q_l L(k \cos \beta \omega'_l - k \sin \beta + \cos \beta \omega'_l + \sin \beta) + qL(\cos \beta \omega'_b + \sin \beta). \quad (23)$$

Опір рухові ланцюга становитиме:

$$W_0 = 1,1S_4 - 0,9S_1. \quad (24)$$

Підставляючи (23) у (24) та вважаючи, що  $S_1 = 3000$ , маємо:

$$W_0 = 1,1 \left[ q_l L \left( k \cos \beta \omega'_l - k \sin \beta + \cos \beta \omega'_l + \sin \beta \right) + qL(\cos \beta \omega'_b + \sin \beta) \right] + (1,1k - 0,9) \cdot S_1. \quad (25)$$

Установлювану потужність двигуна визначаємо так:

$$P_0 = n_y P_p = n_y \frac{W_0 \cdot v}{10^3 \cdot \eta_m}, \quad (26)$$

де  $n_y$  – коефіцієнт запасу потужності двигуна;  $\eta_m$  – коефіцієнт корисної дії механізму.

Підставляючи (25) у (26), маємо:

$$P_0 = \frac{1,1 \cdot n_y \cdot v}{10^3 \cdot \eta_m} \times \left[ kS_1 + q_l L \left( k \cos \beta \omega'_l - k \sin \beta + \cos \beta \omega'_l + \sin \beta \right) + qL(\cos \beta \omega'_b + \sin \beta) + (k - 0,82) \cdot S_1 \right]. \quad (27)$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Підставляючи (15) у (27), маємо:

$$P_0 = \frac{1,1 \cdot n_y \cdot v}{10^3 \cdot \eta_m} \times \left[ kS_1 + k_{\text{л}} \frac{\Pi g}{3,6v} L \left( k \cos \beta \omega_{\text{л}}' - k \sin \beta + \right) + \cos \beta \omega_{\text{л}}' + \sin \beta \right] + \frac{\Pi g}{3,6v} L (\cos \beta \omega_{\text{в}}' + \sin \beta) + (k - 0,82) \cdot S_1 \quad (28)$$

## Результати

Вихідні дані для подальших досліджень беремо такі:

- транспортований матеріал – несортване (кускове рядове) вугілля;
- щільність  $\rho = 0,8 \text{ т/м}^3$ ;
- крупність  $a_{\text{max}} = 250 \text{ мм}$ ;
- продуктивність конвеєра  $\Pi = 63 \text{ т/год}$ ;
- кут нахилу конвеєра  $\beta = 3^\circ$ ;
- довжина конвеєра  $L = 80 \text{ м}$ .

Для визначеності у подальших дослідженнях беремо швидкість руху ланцюгів  $v = 0,5 \text{ м/с}$ .

Величина ширини жолоба залежить від продуктивності, кута нахилу, типу вантажу, кількості ланцюгів (одноланцюговий, дволанцюговий). Оскільки коефіцієнт заповнення жолоба для кускових вантажів перебуває в межах  $\psi_{\text{жс}} = 0,7 \dots 0,8$ , то беремо  $\psi_{\text{жс}} = 0,75$ .

Якщо для скребкових конвеєрів співвідношення  $\frac{B}{h} = 2,4 \dots 4,0$ , то для подальших досліджень беремо  $\frac{B}{h} = 3,2$ .

Отже, із залученням формули (2), залежність величини ширини жолоба конвеєра для транспортування несортваного вугілля (після підставлення взятих даних) має вигляд:

$$B = \sqrt{\frac{\Pi}{675 \cdot k_{\beta}}} \quad (29)$$

Крім того, мають виконуватись умови (9)–(10), які для взятих даних мають вигляд:

$$\left[ \sqrt{\frac{\Pi}{384 k_{\beta}}} + 120 \right] \geq 1,5 a_{\text{max}} \quad (30)$$

$$\sqrt{\frac{\Pi}{675 \cdot k_{\beta}}} \geq k_c a_{\text{max}} \quad (31)$$

Таким чином, мінімальна ширина жолоба має величину:

$$B_{\text{min}} = k_c a_{\text{max}} \quad (32)$$

Чітко бачимо, що вона залежить від максимальної крупності транспортованого вантажу та кількості ланцюгів. Отже, у розглянутому випадку вона має дорівнювати:

- для дволанцюгового конвеєра:

$$B_{\text{min}} = 2,25 \cdot 250 = 563 \text{ мм};$$

- для одноланцюгового конвеєра:

$$B_{\text{min}} = 2,75 \cdot 250 = 688 \text{ мм}.$$

Таким чином, ширину жолоба рохраховуємо за залежністю:

$$B = \begin{cases} \sqrt{\frac{\Pi}{675 \cdot k_{\beta}}}, & B \geq B_{\text{min}}; \\ B_{\text{min}}, & B < B_{\text{min}}. \end{cases} \quad (33)$$

Крім того, остаточну величину необхідно обирати з ряду, який іде з кроком у 100 мм, округляючи в більшу сторону.

Таким чином, графічна залежність ширини жолоба дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини проєктної продуктивності за кута нахилу жолоба до  $20^\circ$  та транспортування несортваного вугілля має вигляд, поданий на рис. 3.

Чітко бачимо, що вона дорівнює константі  $B_{\text{min}} = 563 \text{ мм}$  до значення продуктивності 214 т/год (завдяки умові (31)), а потім є монотонно зростаючою функцією.

Графічна залежність ширини жолоба одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини проєктної продуктивності за кута нахилу жолоба до  $20^\circ$  та транспортування несортваного вугілля має вигляд, поданий на рис. 4.

## МАШИНОБУДУВАННЯ

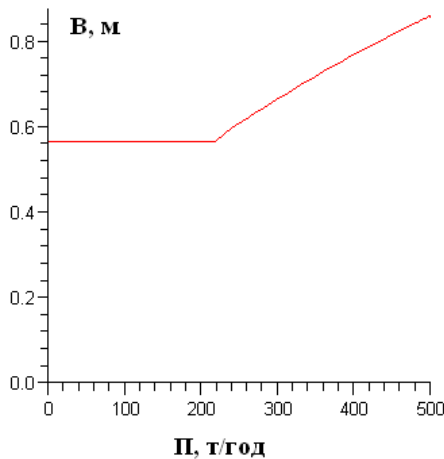


Рис. 3. Графічна залежність ширини жолоба дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини проєктної продуктивності за кута нахилу жолоба до  $20^\circ$  та транспортування несортованого вугілля

Fig. 3. Graphical dependence of the chute width of a two-chain scraper conveyor with an upper working branch on the design capacity at a chute inclination angle of up to  $20^\circ$  and transportation of unsorted coal

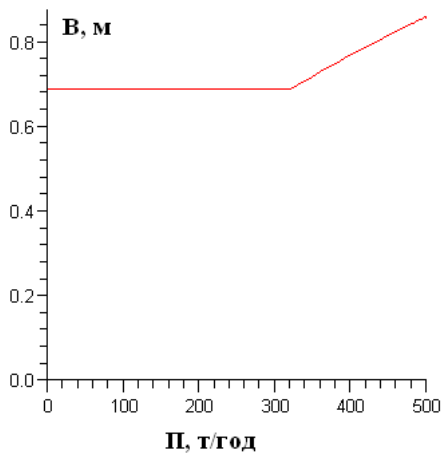


Рис. 4. Графічна залежність ширини жолоба одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини проєктної продуктивності за кута нахилу жолоба до  $20^\circ$  та транспортування несортованого вугілля

Fig. 4. Graphical dependence of the chute width of a single-chain scraper conveyor with an upper working branch on the design capacity at a chute inclination angle of up to  $20^\circ$  and transportation of unsorted coal

Із рис. 3 і 4 видно, що в разі одноланцюгового виконання конвеєра мінімальна ширина жолоба  $B_{\min}$  є більшою, ніж дволанцюгового (за однакових інших вихідних даних).

Для побудови графічної залежності величини ширини жолоба одноланцюгового скребкового конвеєра від кута його нахилу беремо продуктивність конвеєра 320 т/год. Отже, залежність має вигляд, поданий на рис. 5.

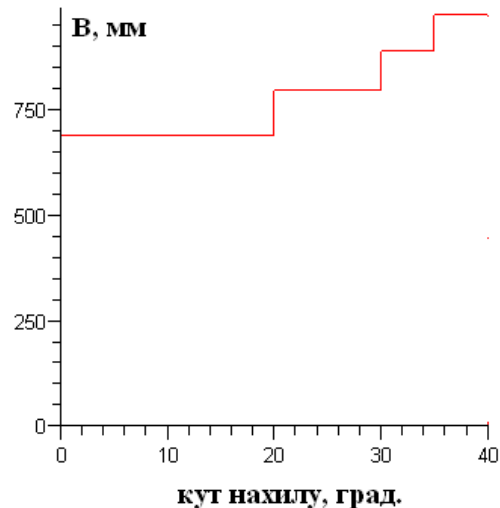


Рис. 5. Графічна залежність ширини жолоба одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від кута нахилу жолоба під час транспортування несортованого вугілля

Fig. 5. Graphical dependence of the trough width of a single-chain scraper conveyor with an upper working branch on the trough angle during transportation of unsorted coal

Чітко бачимо, що функція зміни ширини має ступінчастий монотонно зростаючий характер.

Для подальших досліджень у розрахунку величини установлюваної потужності двигуна приводу конвеєра беремо такі дані:

- коефіцієнт збільшення натягу ланцюгів у процесі обертання зірочки  $k = 1,1$ ;
- коефіцієнт опору рухові ланцюгів: для ланцюгів із ходовими котками на підшипниках ковзання  $\omega'_l = 0,115$ , для ланцюгів без котків, коли вантаж рухається по жолобу,  $\omega'_l = 0,38$ ;
- коефіцієнт опору рухові вантажу по жолобу в разі переміщення вугілля  $\omega'_b = 0,55$ ;
- коефіцієнт запасу потужності двигуна  $n_y = 1,2$ ;
- коефіцієнт корисної дії механізму  $\eta_m = 0,85$ .

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Підставляючи взяті дані у (28), маємо:

$$P_0 = 4,36\Pi L \left[ k_{\pi} (0,735 \cos \beta - 0,1 \sin \beta) + \right. \\ \left. + (0,45 \cos \beta + \sin \beta) \right] + \\ + 6624v. \quad (34)$$

Отже, залежність установлюваної потужності має вигляд:

– для одноланцюгових конвеєрів, якщо  $k_{\pi} = 0,55$ :

$$P_0 = 4,36\Pi L \left[ (0,854 \cos \beta + 0,945 \sin \beta) \right] + \\ + 6624v; \quad (35)$$

– для дволанцюгових конвеєрів, якщо  $k_{\pi} = 0,7$ :

$$P_0 = 4,36\Pi L \left[ (0,965 \cos \beta + 0,93 \sin \beta) \right] + \\ + 6624v. \quad (36)$$

Для проведення подальших досліджень беремо раціональні діапазони зміни проєктних величин:

- продуктивність  $\Pi = 0 \dots 500$  т/год;
- довжина транспортування  $L = 0 \dots 100$  м;
- кут нахилу  $\beta = 0 \dots 40^\circ$ .

Для швидкості руху ланцюга (ланцюгів)  $v = 0,5$  м/с залежності (35) та (36) мають вигляд:

– для одноланцюгових конвеєрів:

$$P_0 = 4,36\Pi L \left[ (0,854 \cos \beta + 0,945 \sin \beta) \right] + \\ + 3312 \text{ Вт}; \quad (35)$$

– для дволанцюгових конвеєрів:

$$P_0 = 4,36\Pi L \left[ (0,965 \cos \beta + 0,93 \sin \beta) \right] + \\ + 3312 \text{ Вт}. \quad (36)$$

Графічна залежність установлюваної потужності двигуна одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини кута нахилу жолоба під час транспортування несортваного вугілля,  $L = 80$  м та  $\Pi = 320$  т/год, має вигляд, поданий на рис. 6.

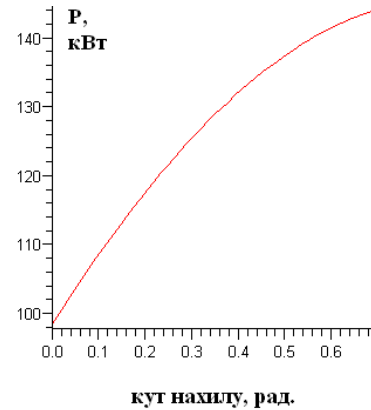


Рис. 6. Графічна залежність установлюваної потужності двигуна одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини кута нахилу жолоба та транспортування несортваного вугілля

Fig. 6. Graphical dependence of the installed motor power of a single-chain scraper conveyor with an upper working branch on the value of the chute inclination angle and transportation of unsorted coal

Графічна залежність установлюваної потужності двигуна дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини кута нахилу жолоба під час транспортування несортваного вугілля,  $L = 80$  м та  $\Pi = 320$  т/год, має вигляд, поданий на рис. 7.

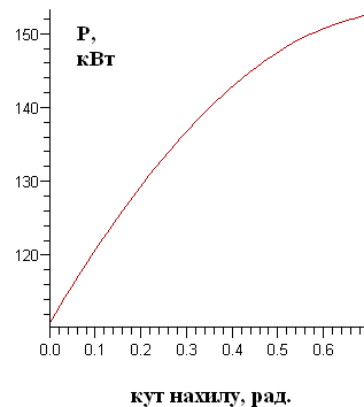


Рис. 7. Графічна залежність установлюваної потужності двигуна дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини кута нахилу жолоба та транспортування несортваного вугілля за  $L = 80$  м та  $\Pi = 320$  т/год

Fig. 7. Graphical dependence of the installed motor power of a two-chain scraper conveyor with an upper working branch on the chute angle and transportation of unsorted coal in  $L = 80$  m and  $\Pi = 320$  t/h

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Чітко бачимо, що обидві залежності є нелінійними та монотонно зростальними.

Графічна залежність установлюваної потужності двигуна одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини довжини транспортування в разі транспортування несортваного вугілля,  $\beta = 30^\circ$  та  $\Pi = 320$  т/год, має вигляд, поданий на рис. 8.

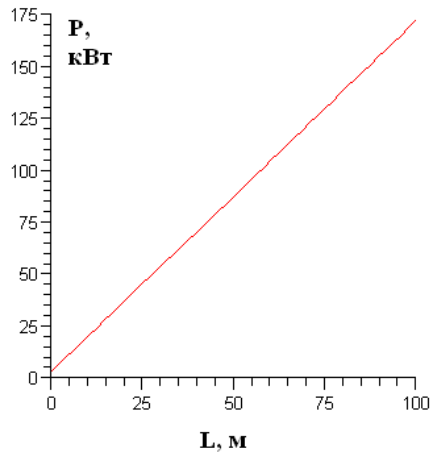


Рис. 8. Графічна залежність установлюваної потужності двигуна одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини довжини транспортування

Fig. 8. Graphical dependence of the installed motor power of a single-chain scraper conveyor with an upper working branch on the length of transportation

Графічна залежність установлюваної потужності двигуна дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини довжини транспортування в разі транспортування несортваного вугілля, кута нахилу  $\beta = 30^\circ$  та  $\Pi = 320$  т/год, має вигляд, поданий на рис. 9.

З аналізу функції зміни величини потужності приводу на рис. 7 та 8 легко зробити висновок, що вони є зростальними та лінійними.

Графічна залежність установлюваної потужності двигуна одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величин продуктивності та кута нахилу жолоба у випадку транспортування несортваного вугілля та  $L = 80$  м має вигляд, поданий на рис. 10.

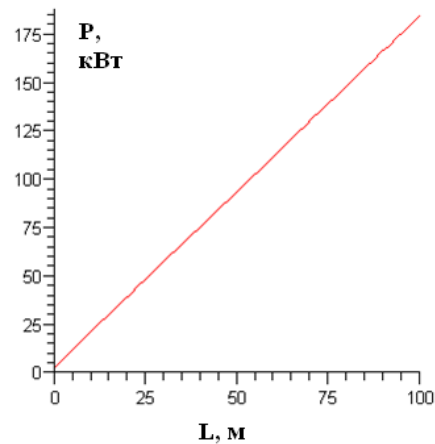


Рис. 9. Графічна залежність установлюваної потужності двигуна дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величини довжини транспортування

Fig. 9. Graphical dependence of the installed motor power of a two-chain scraper conveyor with an upper working branch on the length of transportation

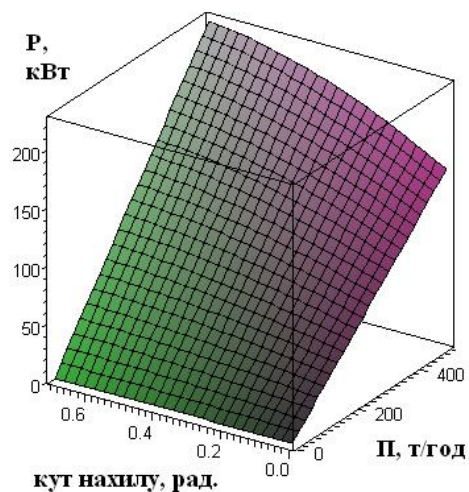


Рис. 10. Графічна залежність установлюваної потужності двигуна одноланцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величин продуктивності та кута нахилу жолоба

Fig. 10. Graphical dependence of the installed motor power of a single-chain scraper conveyor with an upper working branch on the values of productivity and the angle of inclination of the chute

Графічна залежність установлюваної потужності двигуна дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величин продуктивності та кута нахилу жолоба під час транспортування несортваного вугілля та  $L = 80$  м має вигляд, поданий на рис. 11.

## МАШИНОБУДУВАННЯ

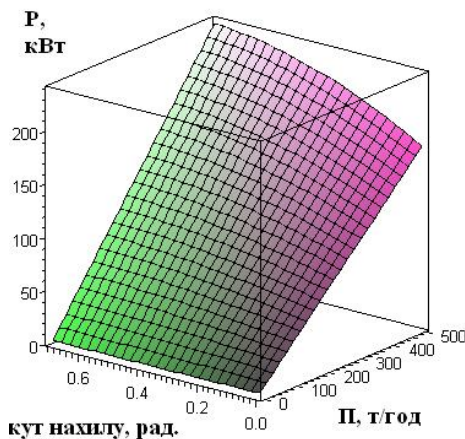


Рис. 11. Графічна залежність установлюваної потужності двигуна дволанцюгового скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від величин продуктивності та кута нахилу жолоба

Fig. 11. Graphical dependence of the installed motor power of a two-chain scraper conveyor with an upper working branch on the values of productivity and the angle of inclination of the chute

### Наукова новизна та практична значимість

Виконано дослідження залежності потужності приводу, геометричних розмірів жолоба скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою від проєктних параметрів. Побудовано аналітичні залежності технічних характеристик (потужності приводу та ширини жолоба) від проєктних параметрів: типу та фізико-механічних властивостей вантажу, довжини та кута нахилу траси транспортування, продуктивності. Для конкретного вантажу і типу конвеєра з одно- та дволанцюговим виконанням побудовано графічні залежності ширини жолоба та потужності приводу від величини продуктивності, довжини конвеєра, кута нахилу траси.

Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер зміни вищезазначених технічних характеристик

у разі варіювання проєктних параметрів (продуктивність, довжина та кут нахилу конвеєра). Запропоновані залежності можуть бути використані для швидкого визначення раціональної величини потужності приводу конвеєра за конкретних проєктних даних.

### Висновки

Для скребкового конвеєра з верхньою робочою гілкою виконано:

- аналіз конструкції та сучасної методики розрахунку необхідної потужності приводу;

- аналіз факторів та величин, які впливають на значення потужності приводу та геометричних параметрів жолоба конвеєра;

- побудову аналітичної залежності для визначення ширини жолоба за заданих проєктних параметрів;

- побудову аналітичної залежності для визначення потужності приводу від типу вантажу та його властивостей, довжини транспортування та кута нахилу конвеєра, продуктивності за фіксованих інших параметрів;

- графічний аналіз впливу кута нахилу, продуктивності на величину ширини жолоба;

- графічний аналіз впливу кута нахилу, продуктивності та довжини транспортування на величину потужності приводу.

У результаті дослідження встановлено:

- функція зміни величини ширини жолоба конвеєра від продуктивності є зростаюною (у разі фіксованих інших параметрів), а від кута нахилу – ступінчастою зростаюною;

- функція зміни величини потужності приводу від продуктивності та довжини транспортування – лінійною зростаюною, від кута нахилу траси – нелінійно зростаюною.

Для продовження роботи пропонуємо побудувати алгоритм прискореного розрахунку потужності приводу за вихідними даними для проєктування конвеєра розглянутої конструкції.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білостоцький В. О., Мазоренко Д. І., Тіщенко Л. М., Міняйло А. В. *Атлас конструкцій підйомно-транспортних машин. Частина II. Транспортні машини*. Харків : ХНТУСГ, 2009. 98 с.
2. Богомаз В. М., Анофрієв П. Г. Дослідження впливу проєктних параметрів вібраційного конвеєра на його технічні характеристики. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 3 (103). С. 60–68. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2023/292718>

## МАШИНОБУДУВАННЯ

3. Богомаз В. М., Нагачевський В. Й., Приймак М. В. Аналіз впливу параметрів експлуатації машин на технічні характеристики елеватора в пункті чищення та миття парку техніки. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 3 (107). С. 40–50. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2024/312922>
4. Бондарев В. С., Дубинець О. І., Колісник М. П. *Підійомно-транспортні машини: розрахунки підіймальних 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. Зайченко С. В., Побігайло В. А., Дубовик В. Г. *Транспортні системи електромеханічних комплексів: конспект лекцій для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.
7. Іванченко Ф. К. *Підійомно-транспортні машини*: підручник. Київ : Вища школа, 1993. 413 с.
8. Jiang S., Ren, W., Mao Q., Zeng Q., Yu P., Gao K., Wang L. Dynamic analysis of the scraper conveyor under abnormal operating conditions based on the vibration and speed characteristics. *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021, No. 2. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8887744>
9. Li S., Zhu Z.C., Lu H., Shen G. Time-dependent reliability and optimal design of scraper chains based on fretting wear process. *Engineering Computations*. 2021. Vol. 38, No. 10. P. 3673–3693. DOI: <http://doi.org/10.1108/ec-09-2020-0548>
10. Liu Z.-X., Xie C.-X., Mao J. Analysis of operation resistance of scraper conveyor based on material distribution characteristics. *Journal of China Coal Society*. 2018. Vol. 43, No. 3. P. 1155–1161. DOI: <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2017.1389>
11. Lu J., Yang R., Mao J., Xie C. Longitudinal torsional vibrations of the chain drive system of mine scraper conveyor. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 1–15. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41598-023-36357-0>
12. 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. 1–8. DOI: <http://doi.org/10.1051/mateconf/201823001009>
13. Xia R., Wang X., Li B., Wei X., Yang Z. The prediction of wear on a scraper conveyor chute affected by different factors based on the discrete element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. Vol. 233, No. 17. P. 6229–6239. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219861130>
14. Zhang Q., Zhang R.X., Tian Y. Scraper conveyor structure improvement and performance comparative analysis. *Strength of Materials*. 2020. Vol. 52. P. 683–690. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00218-2>

V. M. BOGOMAZ<sup>1\*</sup>, V. J. NAGACHEVSKYI<sup>2</sup>

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

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

## Research of the Influence of Design Parameters of a Scraper Conveyor with an Upper Working Branch on its Technical Characteristics

**Purpose.** The research is aimed at: determining the nature of the influence of design parameters on the technical characteristics of a scraper conveyor with an upper working branch (width, height of the chute and drive power); building analytical dependencies of these values on the design characteristics: type and physical and mechanical properties of the cargo, transportation length, productivity, angle of inclination of the route; conducting a graphical analysis of the nature of the influence. **Methodology.** To achieve this goal, we used the calculation algorithms presented in the modern technical literature, analyzed the factors and values that affect the value of the drive power and the geometric parameters of the conveyor chute. It has been established that to determine the drive power of vibratory conveyors, it is necessary to carry out a detailed calculation, which includes: the width and height of the chute, the pitch and height of the scrapers, the forces at the characteristic points of the route by the method of traversing the contour, and the resistance to load movement. **Findings.** For a scraper conveyor with an upper working branch designed to transport unsorted coal, a graphical analysis of the influence of the transportation length, the angle of inclination of the route, and productivity on the drive power and geometric dimensions of the chute was carried out. It

## МАШИНОБУДУВАННЯ

was found that the function of change in the width of the conveyor chute on the capacity is increasing (with other parameters fixed), and on the angle of inclination – a stepwise increasing function; the function of change in the drive power on the capacity and length of transportation – linearly increasing, on the angle of inclination of the route – nonlinearly increasing. **Originality.** The authors first studied the dependence of drive power and chute width of a scraper conveyor with an upper working branch, built analytical dependencies of technical characteristics (drive power, chute width and height) on design parameters: productivity, transportation length, type and physical and mechanical properties of the transported cargo, and the angle of inclination of the route. For a conveyor that transports unsorted coal, graphical dependencies of the chute width and drive power on the capacity, transportation length, and route angle were constructed. **Practical value.** The use of the constructed dependencies makes it possible to determine the general nature of the change in the above technical characteristics in the case of varying design parameters such as capacity, conveyor length, and angle of inclination. The proposed dependencies can be used to quickly determine the rational power of the conveyor drive for specific design data.

*Keywords:* scraper conveyor; productivity; power; drive

## REFERENCES

1. Bilostotskyi, V. O., Mazorenko, D. I., Tishchenko, L. M., & Minyaylo, A. V. (2009). *Atlas konstruktсии pidyomno-transportnykh mashyn. Chastyna II. Transportni mashyny*. Kharkiv: KhNTUSG. (in Ukrainian)
2. Bohomaz, V. M., & Anofriev, P. H. (2023). Influence of design parameters of vibrating conveyor on its technical characteristics. *Science and Transport Progress*, 3(103), 60-68. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/292718> (in Ukrainian)
3. Bohomaz, V. M., Nahachevskyi, V. Y., & Pryimak, M. V. (2024). Analysis of the influence of machine operation parameters on the technical characteristics of elevator at the cleaning and washing station. *Science and Transport Progress*, 3(107), 40-50. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/312922> (in Ukrainian)
4. Bondarev, V. S., Dubynets, O. I., & Kolisnyk, M. P. (2009). *Pidiomno-transportni mashyny: rozrakhunky pidiimalnykh i transportovalnykh mashyn*: pidruchnyk. Kyiv: Vyshcha Shkola. (in Ukrainian)
5. Dereza, O. O. (2016). *Mashyny bezperervnoho transportu*. Melitopol: Tavriyskyi Derzhavnyi Ahrotekhnichnyi Universytet. (in Ukrainian)
6. Zaichenko, S. V., Pobihailo, V. A., & Dubovyk, V. H. (2022). *Transportni systemy elektromekhanichnykh kompleksiv*: konspekt lektsii dlia stud. spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Kyiv: KPI named after Ihor Sikorskyi. (in Ukrainian)
7. Ivanchenko, F. K. (1993). *Pidiomno-transportni mashyny*: pidruchnyk. Kyiv: Vyshcha Shkola. (in Ukrainian)
8. Jiang, S., Ren, W., Mao, Q., Zeng, Q., Yu, P., Gao, K., & Wang, L. (2021). Dynamic analysis of the scraper conveyor under abnormal operating conditions based on the vibration and speed characteristics. *Shock and Vibration*, 2021(2), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8887744> (in English)
9. Li, S., Zhu, Z. C., Lu, H., & Shen, G. (2021). Time-dependent reliability and optimal design of scraper chains based on fretting wear process. *Engineering Computations*, 38(10), 3673-3693. DOI: <https://doi.org/10.1108/ec-09-2020-0548> (in English)
10. Liu, Z. X., Xie, C. X., & Mao, J. (2018). Analysis of operation resistance of scraper conveyor based on material distribution characteristics. *Journal of China Coal Society*, 43(3), 1155-1161. DOI: <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2017.1389> (in English)
11. Lu, J., Yang, R., Mao, J., & Xie, C. (2023). Longitudinal torsional vibrations of the chain drive system of mine scraper conveyor. *Scientific Reports*, 13(1), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36357-0> (in English)
12. 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)
13. Xia, R., Wang, X., Li, B., Wei, X., & Yang, Z. (2019). The prediction of wear on a scraper conveyor chute affected by different factors based on the discrete element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(17), 6229-6239. DOI: <https://doi.org/10.1177/09554406219861130> (in English)
14. Zhang, Q., Zhang, R. X., & Tian, Y. (2020). Scraper conveyor structure improvement and performance comparative analysis. *Strength of Materials*, 52, 683-690. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00218-2> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.11.2024

Прийнята до друку: 12.03.2025

# РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.424:621.333

Є. С. РЯБОВ<sup>1\*</sup>, Б. Х. ЄРЦЯН<sup>2</sup>, А. С. ТИХОНОВ<sup>3</sup>, О. А. ХАЗОВ<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта Andrii.Tykhonov@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0002-7014-1186

<sup>4</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта oleksii.khazov@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-8922-5888

## Гібридна тягова система для вивізного локомотива промислових кар'єрних залізниць

**Мета.** У статті передбачено визначити параметри гібридної тягової системи тепловоза для вивізної роботи на промислових кар'єрних залізницях. **Методика.** Дослідження проведено на прикладі ділянки кар'єрної залізниці Північного гірничо-збагачувального комбінату. Показано, що для визначення параметрів тягової системи необхідно враховувати роботу в тягових і гальмівних системах для вантажного і порожнього напівреїсів. Розрахунки виконано з використанням положень теорії локомотивної тяги. **Результати.** Визначено, що на заданому профілю колії з найбільшим підйомом 35 % двосекційний дванадцятивісний тепловоз може вести поїзд з 12 навантаженими вагонами (думпкарами). Швидкість руху при цьому становить 10 км/год, дотична потужність – близько 2 400 кВт. Для забезпечення гальмування навантаженого поїзда на досліджуваному маршруті (найбільший ухил (спуск) складає 28 %) дотична потужність має становити 3 000 кВт, рух буде здійснюватися зі швидкістю 15 км/год. Запропоновано застосувати гібридну тягову систему, до енергетичної установки якої входить накопичувач енергії. Для забезпечення високих тягових властивостей необхідно застосувати тяговий електропривод на основі електродвигунів змінного струму. Під час використання тягових асинхронних електродвигунів можливе повільне живлення та керування електродвигунами, що дозволить забезпечити високі тягові властивості локомотива. Показано доцільність обладнання локомотива пристроями, які забезпечують його живлення від контактної мережі під час руху по електрифікованих ділянках. Розроблено 3D-ескіз розміщення обладнання гібридної тягової системи на тепловозі 2TE10M. Для розробки ескізу використано моделі дизель-генераторної установки потужністю 800 кВт та накопичувача енергії ємністю 500 кВт·год з піковою потужністю 1 000 кВт. **Наукова новизна.** Визначено параметри локомотива з дворегімовим живленням, обладнаного гібридною тяговою системою та призначеного для вивізної роботи на промислових кар'єрних залізницях. **Практична значимість.** Отримані результати можна використати під час розробки проєктів модернізації вивізних тепловозів та створення нового тягового рухомого складу для кар'єрних і магістральних залізниць.

**Ключові слова:** рухомий склад; локомотив; гібридна тягова система; дизельний двигун; накопичувач енергії; тяговий електропривод; тяговий асинхронний електродвигун

### Вступ

Перехід до зеленої металургії передбачає використання технологій, які забезпечують зниження викидів CO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub> на всіх етапах виробництва металу. Видобуток залізної руди є первинною ланкою виробничого процесу. На вітчизняних підприємствах, які ведуть видобуток залізної руди відкритим способом, для її транспортування з кар'єру до збагачувального комбінату, використовують залізничний транспорт. Для водіння поїздів за маршрутами, де є неелектрифіковані ділянки, застосовують магістральні вантажні тепловози 2ТЕ10М(В), 2ТЕ116 та маневрово-вивізні тепловози ТЕМ7. Також застосовують тепловози серій М62, ТЕМ2, ЧМЕ3 та серії ТГМ.

Найпоширенішими є магістральні тепловози 2ТЕ10М(В) та 2ТЕ116. Аналіз показує, що їх експлуатація відбувається в режимах, які не є проектними для тривалої роботи. Так, швидкість руху на лініях гірничо-збагачувальних комбінатів не перевищує 20 км/год на горизонтальних ділянках та знижується до 10 км/год на підйомах. При цьому швидкість тривалого режиму тепловоза 2ТЕ10М складає 23 км/год, тепловоза 2ТЕ116 – 24 км/год. Під час руху на підйомі зі швидкістю 10 км/год сила тяги тепловозів становить близько 700 кН, що перевищує тривалу силу тяги тепловозів, близьку до 500 кН. Унаслідок цього електрообладнання

працює з перевантаженням за струмом, що збільшує ризик його пошкодження. Робота в таких режимах здійснюється зі зменшеним ККД тягових електричних машин, що збільшує споживання пального і так не надто економічних дизельних двигунів. Крім того, застарілі дизелі не відповідають сучасним вимогам щодо викидів шкідливих речовин, що в певних випадках суттєво впливає на конкурентоспроможність продукції. Зношеність локомотивного парку призводить до зростання витрат на технічне обслуговування та ремонт. Тому оновлення локомотивного парку є важливим для забезпечення стабільності та більш ефективної роботи підприємств.

Підвищення тягово-енергетичних властивостей тепловозів та адаптації до умов експлуатації можна здійснити в разі їх модернізації. Відомі модернізації тепловозів 2ТЕ10М і ТЕМ7 із застосуванням дизелів виробництва АВС, які виконані ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод» (рис. 1, *а*) [9]. Також тепловози 2ТЕ10М(В) були модернізовані із застосуванням модуля SuperSkid виробництва GE Transportation [3] (рис. 1, *б*). Це підвищило паливну економічність тепловозів та зменшило шкідливі викиди. Слід зазначити, що на модернізованих тепловозах застосовано електричну передачу змінно-постійного струму. І саме збереження тягових колекторних електродвигунів унеможливило значне підвищення сили тяги в тривалих режимах роботи.

*а – а*



*б – б*



Рис. 1. Загальний вигляд модернізованих тепловозів (фото з мережі Internet):  
*а* – модернізація ТОВ «МТРЗ»; *б* – модернізація з обладнанням GE Transportation

Fig. 1. General view of modernized diesel locomotives (photo from the Internet):  
*a* – modernization by LLC MTRZ; *b* – modernization with GE Transportation equipment

Роботи з високою силою тяги за низьких швидкостей руху можуть бути забезпечені під час застосування тягового електроприводу на

основі електродвигунів змінного струму, зокрема асинхронних. Крім цього, електропривод такого типу забезпечує вищі коефіцієнти зчеплення [11] та вищу енергетичну ефективність

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

[13]. Також застосування тягового асинхронного електроприводу сприяє підвищенню надійності його роботи та зменшенню витрат на технічне обслуговування.

Іншим напрямом удосконалення тепловозів є підвищення їх паливної економічності. Цього можна досягти шляхом удосконалення керування тепловозом, наприклад, посекційним навантаженням [6]. Перспективним вбачається застосування гібридних енергетичних установок, це забезпечить можливість акумулювання енергії в разі електродинамічного гальмування. Результати робіт із застосування накопичувачів енергії на магістральних локомотивах показують можливість зниження споживання пального понад 25 % [5]. Так, експлуатаційні випробування акумуляторного локомотива FLXdrive розробки Wabtec у складі багатосекційного локомотива забезпечило зниження споживання пального на 11 % під час руху по маршруту [10].

Вбачаємо, що поєднання ефективного тягового електроприводу та гібридної енергетичної установки забезпечить відповідність характеристик тепловоза умовам його експлуатації.

**Мета**

Основною метою статті є визначення параметрів гібридної тягової системи вивізного локомотива промислових кар'єрних залізниць. Досягнення мети передбачає розв'язання задачі із визначення граничних параметрів локомотива та обґрунтування структури досліджуваної тягової системи.

**Методика**

Робота кар'єрних локомотивів із номінальними параметрами здійснюється під час руху на керівному підйомі, розгону та гальмування. В інших режимах робота здійснюється з частковим навантаженням, і тривалість таких режимів достатньо велика. Тому вбачаємо доцільним в разі вибору номінальних параметрів тягового електроприводу враховувати режими роботи.

Розв'язання цієї задачі продемонструємо на прикладі. На рис. 2 показано профіль колії на маршруті від пункту розвантаження до станції Відвальна Північного гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг). Вантажний напіврейс здійснено в напрямку пункту розвантаження.

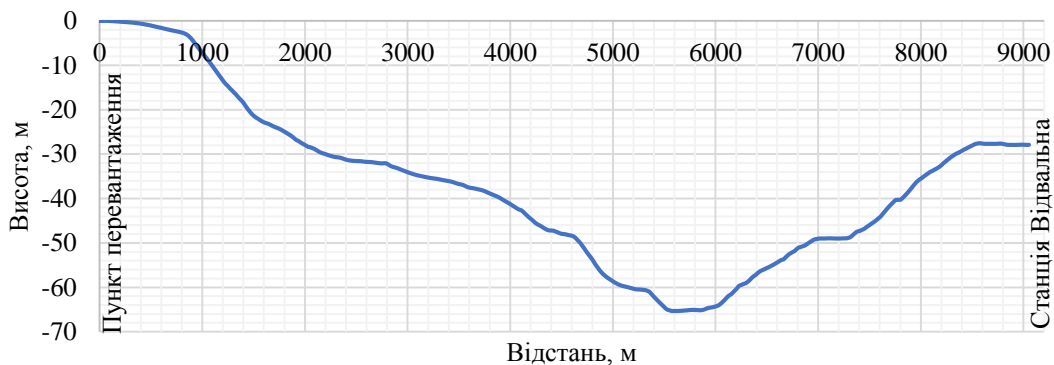


Рис. 2. Поздовжній профіль ділянки колії

Fig. 2. Longitudinal profile of the track section

Для вантажного напіврейсу найбільший підйом складає 35 %, а найбільший спуск – 28 %. Відповідно, для порожнього напіврейсу найбільший підйом складає 28 %, а спуск – 35 %. Довжина цих ділянок не перевищує довжини поїзда, однак для зручності візьмемо ці значення як розрахункові.

Граничні режими роботи тягового електроприводу, за якими буде визначено номінальні параметри, такі:

- тяга на керівному підйомі у вантажному напіврейсі;
- електродинамічне гальмування на керівному спуску у вантажному напіврейсі;
- тяга на керівному підйомі в порожньому напіврейсі;
- електродинамічне гальмування на керівному спуску в порожньому напіврейсі.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вибір таких режимів ґрунтується на тому, що в них різна маса поїзда та швидкості руху, від яких залежить потужність [7].

Аналіз тягових характеристик тепловозів з асинхронним приводом показує, що розрахунковий коефіцієнт зчеплення можна взяти щонайменше на 10...15 % більшим, ніж для тепловозів із колекторними електродвигунами.

Тоді розрахунковий коефіцієнт зчеплення можна визначити за виразом:

$$\Psi = k_{\Psi} \left( 0,118 + \frac{5}{27,5 + V} \right), \quad (1)$$

де  $k_{\Psi}$  – коефіцієнт, який враховує тип тягового електроприводу. Для розрахунків узято рівним 1,15.

Вираз у дужках визначає коефіцієнт зчеплення серійних тепловозів [1].

Кількість думпкарів, яку зможе вести двосекційний тепловоз на керівному підйомі:

$$N_d = \left\lfloor \frac{F_k - w_l M_l - i g M_l}{w_d M_d - i g M_d} \right\rfloor, \quad (2)$$

де  $F_k = M_l g \Psi$  ( $M_l$  – маса тепловозу, взята рівною 300 т;  $g$  – прискорення вільного падіння, рівне  $9,81 \text{ м/с}^2$ );  $w_l = (1,9 + 0,01V + 0,0003V^2)g$  – питомий опір руху тепловоза ( $V$  – швидкість руху у км/год);  $w_d = (3,6 + 0,04V)g$  – питомий опір руху думпкарів;  $M_d$  – маса навантаженого думпкара, взято рівною 165 т;  $i$  – керівний ухил для вантажного напіврейсу, рівний 35 %.

Швидкість усталеного руху поїзда на керівному підйомі для певної кількості думпкарів визначено з рівняння:

$$\begin{aligned} M_l g k_{\Psi} \left( 0,118 + \frac{5}{27,5 + V_p} \right) = \\ = (1,9 + 0,01V_p + 0,0003V_p^2) g M_l + \\ + (3,6 + 0,04V_p) g M_d N_d + i g (M_l + M_d N_d), \quad (3) \end{aligned}$$

де  $V_p$  – швидкість усталеного руху.

Після обчислення швидкості усталеного руху визначено дотичну потужність за виразом:

$$P_k = \frac{F_k V_p}{3,6}. \quad (4)$$

Результати розрахунків кількості думпкарів, усталеної швидкості та потужності наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Результати розрахунку параметрів поїзда

Table 1

## Results of calculation of train parameters

Кількість думпкарів	Швидкість усталеного руху на підйомі, км/год	Дотична потужність тепловоза, кВт
10	20,3	4 245
11	13,7	3 082
12	8,6	2 072

На рис. 3 показано залежність обмеження за зчепленням та опір руху поїзда з 10, 11 і 12 думпкарами. З нього видно, що обмеження за зчепленням знижується, що призводить до необхідності зменшення кількості думпкарів.

У випадку підвищення коефіцієнта зчеплення можливе деяке збільшення швидкості руху. У табл. 2 наведено результати розрахунку дотичної потужності для можливих варіантів складу поїзда та швидкостей руху 10 та 15 км/год на керівному підйомі.

Дотичну потужність визначено за (4) для значень швидкості, вказаних у табл. 2.

Дотичне тягове зусилля визначено за виразом:

$$F_k = w_l g M_l + w_d g M_d N_d + i g (M_l + M_d N_d). \quad (5)$$

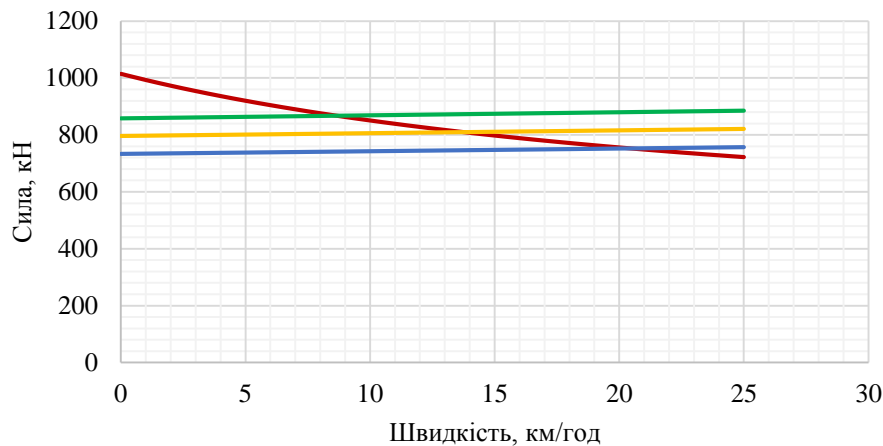


Рис. 3. Розрахункові залежності за зчепленням та опір руху на керівному підйомі (лінія червоного кольору – обмеження за зчепленням; лінія зеленого кольору – опір руху поїзда з 12 думпкарями; лінія жовтого кольору – опір руху поїзда з 11 думпкарями; лінія синього кольору – опір руху поїзда з 10 думпкарями)

Fig. 3. Estimated dependences on traction and resistance on the control climb (red line – traction limitations; green line – resistance to trains with 12 dump cars; yellow line – resistance to trains with 11 dump cars; blue line – resistance to trains with 10 dump cars)

Питомі опори руху локомотива та думпкарів визначено для швидкості руху, вказаній у табл. 2.

Таблиця 2

## Результати розрахунку параметрів руху

Table 2

## Results of calculation of motion parameters

Швидкість на підйомі, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	2 063
	11	2 239
	12*	2 414
15	10	3 116
	11*	3 380

\*прогнозний варіант у разі підвищення коефіцієнта зчеплення

Аналіз даних табл. 1 і 2 показує, що для швидкості руху 10 км/год дотична потужність тепловоза становить від 2 063 до 2 414 кВт. Рух може здійснюватися з 10, 11 та 12 думпкарями.

Для швидкості руху 15 км/год дотична потужність становить 3 116 та 3 380 кВт, рух може здійснюватися з 10 та 11 думпкарями.

Рух зі швидкістю 20 км/год можливий із 10 думпкарями в поїзді. У цьому випадку дотична потужність буде 4 181 кВт.

Як бачимо, зі зменшенням кількості думпкарів у поїзді зростає швидкість руху на керівному підйомі. При цьому збільшення швидкості руху на керівному підйомі сприяє зменшенню тривалості рейсу, що опосередковано впливає на підвищення продуктивності локомотиво-складу. Водночас збільшення кількості думпкарів має безпосередній вплив на зростання продуктивності локомотиво-складу. Вбачаємо, що збільшення кількості думпкарів у поїзді є пріоритетним перед підвищенням швидкості. Однак варто відзначити, що визначення раціональних параметрів поїзда і режимів його руху є комплексною задачею.

Результати розрахунку параметрів руху в разі електродинамічного гальмування для навантаженого поїзда наведено в табл. 3. Для розрахунків узято, що обмеження за зчепленням не змінюється в гальмівних режимах роботи.

Зіставлення даних табл. 1–3 показує, що тяговий електропривід потужністю 2 200...2 500 кВт у тягових режимах та 3 000 кВт у режимах електродинамічного гальмування забезпечить водіння поїздів на досліджуваному профілі.

Таблиця 3

**Результати розрахунку параметрів для руху навантаженого поїзда на спуску 28 %**

Table 3

**Results of calculating the parameters for the movement of a loaded train on a 28 % grade**

Швидкість на спуску, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	1 284
	11	1 392
	12	1 500
15	10	1 906
	11	2 067
	12	2 227
20	10	2 514
	11	2 727
	12	2 939

У табл. 4 і 5 наведено розрахунки для руху порожнього напіврейсу.

Таблиця 4

**Результати розрахунку параметрів руху порожнього рейсу на підйомі 28 %**

Table 4

**Results of calculating the parameters of an empty flight on a 28 % climb**

Швидкість на підйомі, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	689
	11	735
	12	776
15	10	1 044
	11	1 110
	12	1 176
20	10	1 406
	11	1 495
	12	1 583

Таблиця 5

**Результати розрахунку параметрів руху порожнього рейсу на спуску 35 %**

Table 5

**Results of calculating the parameters of an empty flight on a 35 % descent**

Швидкість на підйомі, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	686
	11	727
	12	769
15	10	1 016
	11	1 079
	12	1 142
20	10	1 340
	11	1 424
	12	1 507

Як бачимо, під час руху у порожньому напіврейсі дотична потужність не перевищує значень, отриманих для вантажного напіврейсу. Тому вибір будемо проводити за даними для вантажного напіврейсу.

Згідно з розрахунками дотичної сили тяги за (5), тривала сила тяги для двосекційного тепловоза має становити 860...870 кН. Пускова сила тяги – 980...1 000 кН. Рух на кар'єрних залізницях здійснюють з низькими швидкостями – близько 20 км/год, і навряд чи будуть суттєво збільшувати. Тому швидкість роботи з повною потужністю можна взяти на рівні 25...30 км/год. Для можливості пересилання тепловозів необхідно забезпечити більш високу допустиму швидкість руху.

На рис. 4 показано граничну тягову та гальмівну характеристику двосекційного тепловоза за дотичної потужності 2 500 кВт у тяговому режимі і 3 000 кВт у режимі електродинамічного гальмування.

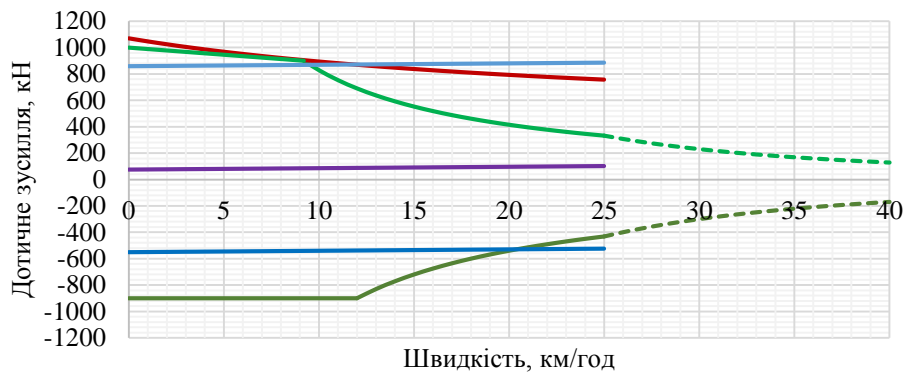


Рис. 4. Тягові характеристики тепловоза (лінія бордового кольору – обмеження за зчеплення для зчіпної маси 2х150 т; лінія світло-зеленого кольору – гранична тягова характеристика (пунктиром показано можливе зниження потужності); лінія блакитного кольору – опір руху навантаженого поїзда з 12 думпкаррами на підйомі 35 %; лінія фіолетового кольору – опір руху навантаженого поїзда з 12 думпкаррами на горизонтальній ділянці; лінія темно-зеленого кольору – гранична гальмівна характеристика; лінія синього кольору – опір руху навантаженого поїзда з 12 думпкаррами на спуску 28 %)

Fig. 4. Traction characteristics of the locomotive (burgundy line – limit on traction at a coupling weight of 2x150 t; light green line – limit traction characteristic (dotted line shows possible power reduction); blue line – resistance to movement of a loaded train with 12 dump cars on a 35% grade; purple line – resistance to movement of a loaded train with 12 dump cars on a horizontal section; dark green line – limit braking characteristic; blue line – resistance to movement of a loaded train with 12 dump cars on a 28 % grade)

## Результати

Для забезпечення високих показників тяговий електропривід має працювати з найвищими тяговими зусиллями. Це досягається за індивідуального живлення і керування тяговими асинхронними електродвигунами. У цьому випадку керування тяговим електродвигуном можна здійснювати з урахуванням фактичного зчеплення колеса з рейкою, яке може змінюватися як від стану поверхонь, які контактують, їх забруднення тощо, так і внаслідок коливань екіпажної частини, за яких буде виникати розвантаження осей. Такий тип приводу може бути створений як із редукторним приводом колісної пари, так і мати безредукторний колісно-моторний блок.

Можливим варіантом є повізкове (групове) живлення та керування тяговими асинхронними електродвигунами. Такий вид живлення застосовано на тепловозах серії Eurorunner виробництва Siemens [10], SD90MAC виробництва EMD та інших. Використання групового живлення і керування зменшує вартість напівпровідникового перетворювача. Однак при цьому втрачається можливість індивідуального керування тя-

говими асинхронними електродвигунами. Водночас теоретичні дослідження за результатами випробувань показують високі зчіпні властивості локомотивів із повізковим живленням і керуванням під час застосування асинхронних двигунів. У випадку використання серійних візків тепловозів 2TE10M, 2TE116 з розміщенням тягових електродвигунів один за одним у статичних режимах не виникає перерозподілу навантажень між осями візка під час дії обертового моменту електродвигуна [2]. Розвантаження осей виникає внаслідок коливань підресорених частин тепловоза, технологічних неточностей та під впливом експлуатаційних факторів, які порушують нормативний розподіл осьового навантаження. Для усунення цього негативного впливу можливе використання пристроїв, що довантажують візок.

Альтернативним варіантом є застосування мономоторного візка з груповим приводом колісних пар [4, 5]. Також можливе застосування групового приводу усіх колісних пар, хоча це створить труднощі під час розміщення паливних баків під рамою тепловоза. Перевагою групового приводу колісних пар є їх механічне з'єднання, що суттєво підвищує стабільність зчеп-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лення. Однак такі варіанти потребують щонайменше розробки нового візка.

На багатьох ГЗК є як електрифіковані, так і неелектрифіковані ділянки. Для уніфікації локомотивного парку доцільно мати локомотив із дво-режимним живленням. Варіанти такого локомотива для кар'єрних залізниць наведено в [14]. При цьому для досліджуваного тепловоза рух під контактним проводом є додатковою функцією,

тому потужність у цьому режимі не буде перевищувати потужність під час руху від дизеля.

На рис. 5 показано варіант схеми тягової системи з комбінованою енергетичною установкою та тяговим електроприводом із повізковим живленням тягових електродвигунів, а на рис. 6 – варіант розміщення обладнання гібридної тягової системи в секції тепловоза 2ТЕ10М.

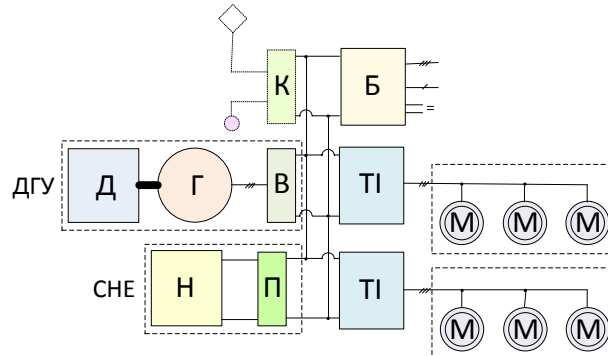


Рис. 5. Функціональна схема тягової системи шестивісної секції:

ДГУ – дизель-генераторна установка; СНЕ – система накопичення енергії; К – напівпровідниковий перетворювач контактної мережі; Д – дизель; Г – генератор; В – випрямляч; Н – накопичувач енергії;

П – погоджувальний перетворювач; ТІ – тяговий інвертор; М – тяговий асинхронний електродвигун; Б – блок живлення допоміжних систем)

Fig. 5. Functional diagram of the traction system of a six-axle section:

ДГУ – diesel-generator set; СНЕ – energy storage system; К – semiconductor converter of the contact network;

Д – diesel; Г – generator; В – rectifier; Н – energy storage; П – matching converter; ТІ – traction inverter, М – traction induction electric motor; Б – power supply unit for auxiliary systems

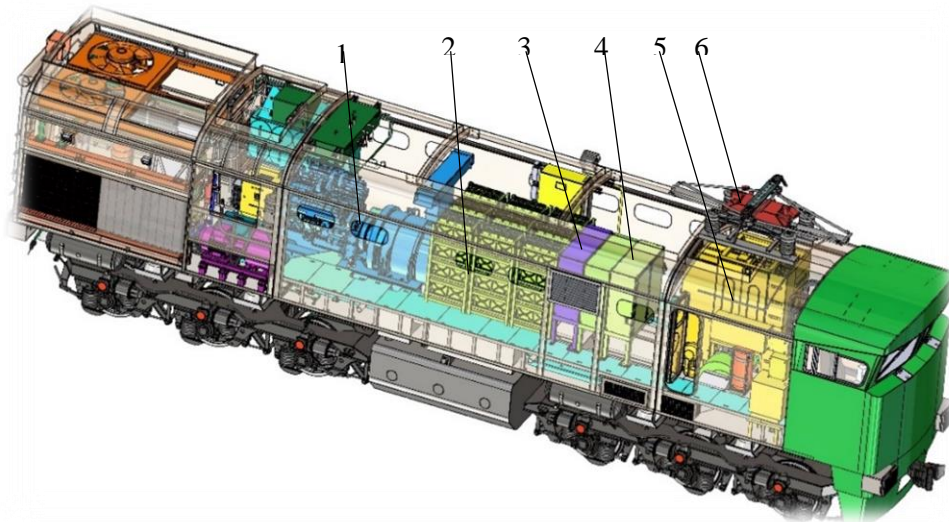


Рис. 6. 3D-ескіз розміщення обладнання гібридної тягової системи:

1 – дизель-генератор; 2 – система накопичення енергії; 3 – погоджувальний перетворювач; 4 – тягові інвертори; 5 – мережевий перетворювач; 6 – струмоприймач

Fig. 6. 3D sketch of the hybrid traction system equipment placement:

1 – diesel generator; 2 – energy storage system; 3 – shaving converter; 4 – traction inverters; 5 – network converter; 6 – pantograph

Енергетична установка складається з дизель-генераторної установки (ДГУ) та бортової системи накопичення енергії (СНЕ). Дизель-генераторна установка утворена дизельним двигуном (Д) та генератором змінного струму (Г). Випрямлення струму здійснюється випрямлячем (В), який вихідними виводами під'єднаний до спільної ланки постійної напруги. Система накопичення енергії утворена накопичувачем (Н) та погоджувальним перетворювачем (П). Для забезпечення можливості живлення від контактної мережі використовують мережевий перетворювач (К) та систему струмознімання, вид якого визначається родом струму, яким електрифіковано лінії на кар'єрі. Також мережевий перетворювач та супутні системи можна використовувати під час заряджання накопичувача енергії від стаціонарного зарядного пристрою.

Тяговий електропривід складається з двох ідентичних тягових інверторів (ТІ), за допомогою яких здійснюється живлення та керування тяговими асинхронними електродвигунами (М). До складу тягових інверторів можуть входити гальмівні перетворювачі. У цьому випадку у схемі будуть наявні гальмівні резистори. Для живлення допоміжних систем використовують блок джерел живлення (Б), у якому передбачено напівпровідникові перетворювачі для живлення мотор-вентиляторів охолодження тягових електричних машин, мотор-вентиляторів охолоджувальних пристроїв дизель-генераторів, гальмівного компресора, бортової мережі і т. д.

3D-моделювання показало можливість розміщення в секції тепловоза дизель-генераторної установки потужністю 800 кВт та накопичувача енергії ємністю 500 кВт·год з піковою потужністю 1 000 кВт. Обладнання з такими параметрами забезпечує роботу локомотива з граничними тяговими характеристиками. Уточнення параметрів може бути виконано шляхом моделювання руху поїзда та процесів енергетичного обміну.

### Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано параметри тепловоза для вивізної роботи на промислових кар'єрних залізницях. Запропоновано структуру гібридної тягової системи для досліджуваного тепловоза та розроблено 3D-ескіз компонування обладнання такої системи.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості їх використання під час оновлення рухомого складу промислових та магістральних залізниць.

### Висновки

Підвищення тягово-енергетичних показників тепловозів для вивізної роботи потребує вдосконалення їх тягових систем. Для підвищення тягових властивостей необхідно застосовувати тяговий електропривід з електродвигунами змінного струму. Зокрема, застосування асинхронного тягового електроприводу забезпечить тривалу роботу з великими значеннями сили тяги за низької швидкості.

Для зменшення споживання пального раціональним є використання гібридної енергетичної установки, яка може бути утворена дизелем та накопичувачем енергії. Доцільно обладнати локомотив пристроями, які забезпечуватимуть його живлення від контактної мережі під час руху по електрифікованих ділянках. Це сприяє зменшенню витрат на паливно-енергетичні ресурси.

За результатами розрахунків встановлено, що для водіння поїзда з 12 думпкаррами на підйомах 35 % необхідний 12-вісний двосекційний тепловоз. Дотична потужність тепловоза має становити 2 200...2 500 кВт, що забезпечує рух зі швидкостями 8,6...10 км/год.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобирь Д. В., Капіца М. І., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту*: навчальний посібник. Укр. держ. ун-т науки і технологій, Навч.-наук. ін-т «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.». Дніпро, 2022. 113 с.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/978-966-2394-62-7>
2. Горобченко О. М. *Удосконалення тягових характеристик локомотивів шляхом підвищення коефіцієнта використання зчпної маси*: автореф. дис. ... канд.техн. наук. Укр. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2007. 22 с.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Модернізація тягового рухомого складу. URL: <https://trz.com.ua/modernization-ua/>
4. Прокопов А. Є., Рябов Є. С. Покращення тягових властивостей промислових локомотивів. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»* (Харків, 19–22 лист. 2024 р.): Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 305–308.
5. Рой С. В., Качан А. В., Тихонов А. С., Якунін Д. І., Рябов Є. С. Застосування тягового електроприводу при модернізації тепловозу ТГМ6. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 46. С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177>
6. Рябов Є. С., Єрціян Б. Х., Колодій І. М., Іванов С. В., Сич О. А., Галич А. В. Підвищення паливної ефективності магістрального тепловоза з роздільним навантаженням секцій. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306145>
7. Рябов Є. С., Мосін С. В., Овер'янова Л. В., Кондратьєва Л. Ю., Демидов О. В. Оцінка технічних параметрів локомотива для залізничного кар'єрного транспорту. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 39. С. 83–100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>
8. *Diesel-electric freight locomotive Eurorunner ER20 CF for Lithuanian Railways (LG)*. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/22796773/diesel-electric-freight-locomotive-eurorunner-er20-cf-siemens>
9. *Engines for traction*. URL: <https://www.abc-engines.com/en/markets/engines-for-traction>
10. *FLXdrive*. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuellocomotives/flxdrive>
11. Graff M. Vectron as an Example of a Modern and Versatile Electric and Diesel Locomotive for Passenger and Freight Transport. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*. 2022. Vol. 66. Iss. 196. P. 105–130. DOI: <https://doi.org/10.36137/1962e>
12. Iden M. E. Battery Storage of Propulsion-Energy for Locomotives. *2014 Joint Rail Conference (Colorado, 2–4 April, 2014)*. Colorado, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3805>
13. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębiowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Seleting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ЧМЕ3, ЧКД S200). *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 1. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010317>
14. Riabov Ie., Iakunin D., Tykhonov A., Roi S., Kachan A. Dual-Powered Locomotive for Hauling Operations in Quarries. *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference*. 2024. P. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P26-29>

Ie. S. RIABOV<sup>1\*</sup>, B. Kh. YERITSYAN<sup>2</sup>, A. S. TYKHONOV<sup>3</sup>, O. A. KHAZOV<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Курьчова Стр., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail Andrii.Tykhonov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0002-7014-1186

<sup>4</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Курьчова Стр., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail oleksii.khazov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-8922-5888

## Hybrid Traction System for a Haulage Locomotive for Industrial Quarry Railways

**Purpose.** The article aims to determine the parameters of a hybrid traction system for a diesel locomotive for haulage work on industrial quarry railways. **Methodology.** The study was carried out on the example of a section of the quarry railroad of the Northern Mining and Processing Plant. It is shown that in order to determine the parameters of the traction system, it is necessary to take into account the work in the traction and braking systems for the freight and empty semi-trains. The calculations were performed using the provisions of the theory of locomotive traction. **Findings.** It has been determined that on a given track profile with a maximum elevation of 35 ‰, a two-section twelve-axle diesel locomotive can drive a train with 12 loaded cars (dump cars). The speed is 10 km/h, and the power

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

output is about 2,400 kW. To ensure the braking of a loaded train on the studied route (the largest slope (downhill) is 28 ‰), the tangential power should be 3,000 kW, and the movement will be carried out at a speed of 15 km/h. It is proposed to use a hybrid traction system, the power plant of which includes an energy storage device. To ensure high traction properties, it is necessary to use a traction electric drive based on AC motors. When using traction asynchronous electric motors, it is possible to use bogie power supply and control of electric motors, which will ensure high traction properties of the locomotive. The expediency of equipping the locomotive with devices that provide its power supply from the contact network while moving along electrified sections is shown. A 3D sketch of the hybrid traction system equipment placement on the 2TE10M diesel locomotive was developed. To develop the sketch, models of an 800 kW diesel generator set and a 500 kWh energy storage device with a peak capacity of 1,000 kW were used. **Originality.** The parameters of a dual-mode locomotive equipped with a hybrid traction system and designed for haulage operations on industrial quarry railways have been determined. **Practical value.** The obtained results can be used in the development of projects for the modernization of diesel locomotives and the creation of new traction rolling stock for quarry and mainline railways.

**Keywords:** rolling stock; locomotive; hybrid traction system; diesel engine; energy storage; traction electric drive; traction induction motor

## REFERENCES

1. Bobyr, D. V., Kapitsa, M. I., & Serdiuk, V. N. (2022). *Theory of locomotive traction. Traction calculations for industrial railway transport: manual*. Ukr. State Univ. of Science and Technologies, Educational and Scientific Institute «Dnipro Institute of Infrastructure and Transport». Dnipro.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/978-966-2394-62-7> (in Ukrainian)
2. Gorobchenko, A. N. (2007). *Increase of locomotives traction properties by increase operating ratio of coupling weight* (Extended abstract of PhD dissertation). Ukrainian state academy of a railway transport. Kharkov, Ukraine. (in Ukrainian)
3. *Modernization of locomotives*. Retrieved from <https://trz.com.ua/modernization-ua/> (in Ukrainian)
4. Prokopov, A. Ye., & Riabov, Ye. S. (2024). Pokrashchennia tiahovykh vlastyvostei promyslovykh lokomotyviv. In *XVIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv «Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh»*. Kharkiv: NTU «KhPI». (in Ukrainian)
5. Roi, S. V., Kachan, A. V., Tykhonov, A. S., Iakunin, D. I., & Riabov, Ye. S. (2023). Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 46, 93-102.  
DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177> (in Ukrainian)
6. Riabov, Ye. S., Yeritsian, B. Kh., Kolodii, I. M., Ivanov, S. V., Sych, O. A., & Halych, A. V. (2024). Increasing the Fuel Efficiency of a Mainline Diesel Locomotive with Separate Section Loading. *Science and Transport Progress*, 2(106), 64-79. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306145> (in Ukrainian)
7. Riabov, I., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Goolak, S. (2022). Evaluation of technical parameters locomotive for railway career transport. *Transport systems and technologies*, 39, 83-100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9> (in Ukrainian)
8. *Diesel-electric freight locomotive Eurorunner ER20 CF for Lithuanian Railways (LG)*. Retrieved from <https://www.yumpu.com/en/document/view/22796773/diesel-electric-freight-locomotive-eurorunner-er20-cf-siemens> (in English)
9. *Engines for traction*. Retrieved from <https://www.abc-engines.com/en/markets/engines-for-traction> (in English)
10. *FLXdrive*. Retrieved from <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuellocomotives/flxdrive> (in English)
11. Graff, M. (2022). Vectron as an Example of a Modern and Versatile Electric and Diesel Locomotive for Passenger and Freight Transport. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*, 66(196), 105-130.  
DOI: <https://doi.org/10.36137/1962e> (in English)
12. Iden, M. E. (2014, April). Battery Storage of Propulsion-Energy for Locomotives. In *2014 Joint Rail Conference*. Colorado, USA. DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3805> (in English)
13. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębiowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L. & Opala M. (2022). Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives – Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ЧМЕ3, ČKD S200). *Energies*, 15(1), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010317> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

---

14. Riabov Ie., Iakunin D., Tykhonov A., Roi S., Kachan A. (2024). Dual-Powered Locomotive for Hauling Operations in Quarries. In *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference* (pp. 26-29). DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P26-29> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.11.2024

Прийнята до друку: 14.03.2025

## УДК 629.45:001.891.3/.5(479.24)

Л. В. УРСУЛЯК<sup>1\*</sup>, О. О. БОЛОТОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технічна механіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 286 63 49, ел. пошта lydm.urs@gmail.com, ORCID 0000-0001-5957-6926

<sup>2\*</sup>Каф. «Технічна механіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 977 57 08, ел. пошта o.o.bolotov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0807-0340

## Дослідження поздовжньої динаміки пасажирських поїздів для надання рекомендацій з керування ними на нових ділянках Азербайджанської залізниці

**Мета.** Для організації безпечного, з позиції поздовжньої динаміки, руху поїздів на ділянках Азербайджанської залізниці, які вводять в експлуатацію, у роботі передбачено надати рекомендації щодо керування рухом пасажирських поїздів та електропоїздів для реалізації максимально можливої швидкості руху з урахуванням технічних можливостей локомотивів та параметрів поздовжнього профілю. **Методика.** Оцінку найбільших значень поздовжніх прискорень виконано за допомогою комп'ютерного моделювання поздовжніх коливань пасажирських поїздів під час їх руху з різними швидкостями на ділянках із найбільш несприятливими параметрами профілю та плану колії, які накладаються на збурення поїзда від дій машиніста з керування його рухом. Наведено математичне моделювання силових характеристик міжвагонних з'єднань пасажирських вагонів, обладнаних модернізованими гумометалевими поглинальними апаратами. Для підтвердження достовірності математичної моделі проведено порівняння максимальних величин поздовжніх прискорень вагонів та величин гальмівних шляхів, отриманих у результаті математичного моделювання руху пасажирських поїздів, з аналогічними величинами, які було отримано під час експериментальних поїздок.

**Результати.** З допомогою комп'ютерного моделювання поздовжніх коливань поїздів отримано діаграми розподілу найбільших поздовжніх прискорень по довжині поїздів з різною кількістю вагонів, величини гальмівних шляхів та час гальмування. Для запропонованих режимів керування поїздами проаналізовано залежності швидкості руху від координати шляху. Зазначено, що для розглянутих режимів ведення пасажирських поїздів та електропоїздів із зазначеними швидкостями руху на визначених ділянках залізниць рівень поздовжніх прискорень вагонів не перевищує значень, які вплинуть на безпеку руху поїздів та комфорт поїздки пасажирів. **Наукова новизна.** Автори вперше запропонували математичну модель силової характеристики модернізованого поглинального апарата, яким оснащені пасажирські вагони на Азербайджанській залізниці. Досліджено поздовжню навантаженість електропоїздів та пасажирських поїздів, а також криві швидкості руху за різних режимів ведення поїздів на окремих ділянках Азербайджанської залізниці. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів надано рекомендації з керування рухом пасажирських поїздів на реальних ділянках колії для підтримання заданої швидкості, з урахуванням технічних можливостей локомотивів та параметрів поздовжнього профілю.

**Ключові слова:** поздовжні прискорення; залізничний транспорт; параметри поздовжнього профілю; швидкість руху поїзда; реалізація керування; гальмівний шлях

### Вступ

Під час вивчення поздовжніх коливань поїзда здебільшого досліджують перехідні режими, на які впливають зазори у міжвагонних з'єднаннях [3, 4, 6, 13]. При цьому найбільш небезпечним є режим гальмування, що супроводжується появою найбільших поздовжніх навантажень [5, 9, 10, 11, 12].

Слід також відзначити, що під час руху поїзда по поздовжньому профілю шляху збурення від зламів профілю можуть накладатися на збу-

рення, які пов'язані з керування рухом. Це може, призвести до виникнення небезпечних поздовжніх прискорень вагонів не тільки в разі гальмування, а й у разі набору тяги [1].

У процесі пошуку причин виникнення небезпечних величин поздовжніх прискорень бажано використовувати не тільки результати експериментальних досліджень, а й методи математичного моделювання руху поїздів, які розглянуто.

Використання при цьому методів об'єктно-орієнтованого програмування і сучасної обчислювальної техніки дозволяє розширити діапа-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

зон задач та розглядати не тільки поздовжні, а й просторові коливання локомотивів і вагонів поїзда, які рухаються по криволінійній залізничній колії, що має нерівності [4, 7, 8].

**Мета**

Для організації безпечного, з позиції поздовжніх прискорень, руху пасажирських поїздів на ділянці довжиною 45 км Азербайджанської залізниці, яку вводять в експлуатацію, передбачено надати рекомендації щодо керування рухом пасажирських поїздів та електропоїздів, щоб реалізувати задану швидкість руху, урахувати технічні можливості локомотивів та параметри поздовжнього профілю колії. Слід розглянути ділянки обмеженої довжини з найбільш несприятливими параметрами профілю та плану колії, збудження від яких накладаються на збурення поїзда від дій машиніста з керування його рухом.

При цьому керування поїздом не повинно спричинити появу значних за величиною прискорень або уповільнень, які можуть призвести до виникнення небезпечних ситуацій або зменшити комфорт поїздки пасажирів.

Потрібно дослідити поздовжню навантаженість поїздів за різних режимів руху та проаналізувати залежності швидкості руху від координат колії з урахуванням параметрів профілю.

**Методика**

Для оцінки поздовжнього навантаження поїздів за математичну модель поздовжніх коливань взято систему істотно нелінійних диференціальних рівнянь, порядок якої залежить від кількості екіпажів у поїзді [3, 4].

Ці коливання супроводжуються дією поздовжніх сил на кожен екіпаж, викликаних перехідними або стаціонарними режимами руху поїзда та обумовлених впливом керівних збурень, переломами поздовжнього профілю колії та її криволінійності в плані.

За збурення, що діють на кожен екіпаж, взято: гальмівну силу, силу опору від профілю та плану колії, силу основного опору поступальному руху поїзда, силу тяги або силу електричного гальмування локомотива та поздовжні сили, що виникають у міжвагонних з'єднаннях [3, 4, 11].

Як відомо, величини поздовжніх зусиль залежать від характеристик поглинальних апаратів.

Під час моделювання руху пасажирського поїзда враховано, що міжвагонні з'єднання обладнані модернізованими гумовометалевими поглинальними апаратами Р–5П. Силу характеристику зазначених поглинальних апаратів наведено на рис. 1 [3].

На рисунку зображено залежність поздовжньої сили  $S_i$  від величини стиснення поглинального апарату  $q_i$ .

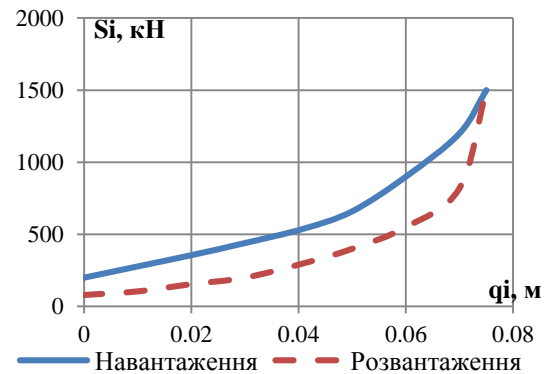


Рис. 1. Силова характеристика гумовометалевого поглинального апарату Р–5П

Fig. 1. Power characteristic of the rubber-metal absorber R–5P

Під час моделювання роботи міжвагонного з'єднання, оснащеного модернізованим поглинальним апаратом Р–5П, враховано також наявність комплектів буферних пристроїв.

Математичну залежність поздовжньої сили  $S_i(q_i, \dot{q}_i)$  від деформації апарату  $q_i$  для  $i$ -го міжвагонного з'єднання можна описати таким чином:

$$S_i(q_i, \dot{q}_i) = \left. \begin{array}{l} q_i \cdot k_{ai}, \text{ якщо } 0 \leq q_i \leq \delta_{0i} \\ \text{якщо } \delta'_{0i} < |q_i| < \Delta_i + \delta'_{0i} \text{ та } q_i \cdot \dot{q}_i \geq 0 \\ (\text{де } \delta'_{0i} = 0, \text{ якщо } q_i < 0 \\ \text{та } \delta'_{0i} = \delta_{0i}, \text{ якщо } q_i > 0) \\ C \cdot e^{B \cdot (q_i - \delta'_{0i})} + D \cdot \dot{q}_i \\ \text{якщо } \delta'_{0i} < |q_i| < \Delta_i + \delta'_{0i} \text{ та } q_i \cdot \dot{q}_i < 0 \\ (1 - \eta_i) \cdot (C \cdot e^{B \cdot (q_i - \delta'_{0i})} + D \cdot \dot{q}_i) \\ \text{якщо } |q_i - \delta'_{0i}| > \Delta_i \\ k_{ki} \cdot (q_i - \Delta_i - \delta'_{0i}) + S_{\max_i} + \beta_i \cdot \dot{q}_i \end{array} \right\}$$

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де  $\delta_{0i}$  – поздовжній зазор у з’єднанні;  $i$  – номер перерізу в поїзді;  $S_i$  – повздовжня сила;  $\Delta_i$  – значення максимального ходу апарату;  $q_i$  – відносне переміщення суміжних вагонів;  $k_{ki}, k_{ai}$  – відповідно поздовжні жорсткості конструкції вагона та буферної пружини в  $i$ -му з’єднанні;  $\beta_i$  – коефіцієнт в’язкого опору деформування конструкції;  $\eta_i$  – коефіцієнт поглинання енергії поглинальним апаратом;  $S_{\max i}$  – сила, за якої поглинальний апарат вимикається;  $C, B, D$  – коефіцієнти для визначення поздовжньої сили в разі навантаження та розвантаження поглинального апарату.

Загалом нелінійність силових характеристик поглинальних апаратів автозчепів і особливо наявність поздовжніх зазорів у міжвагонних з’єднаннях роблять механічну систему «Поїзд» суттєво нелінійною.

Силу, що діє на локомотив у тяговому режимі або під час електричного гальмування, визначено відповідно до наявних тягових або гальмівних характеристик, що відповідають обраному локомотиву [3, 4].

Дослідження поздовжнього навантаження електропоїздів та пасажирських поїздів виконано за допомогою їх комп’ютерного моделювання повздовжніх коливань. При цьому проаналізовано швидкість руху в залежності від обраних режимів керування поїздами на деяких ділянках Азербайджанської залізниці обмеженої довжини, які введено в експлуатацію.

Для дослідження поздовжнього навантаження поїздів використано сучасний програмний комплекс, створений у галузевій лабораторії динаміки та міцності рухомого складу Українського державного університету науки і технологій [3, 4].

Під час математичного моделювання руху електропоїзда «Штадлер» (ЕШ–2) передбачено, що він сформований з 4 двоповерхових вагонів виробництва «Штадлер Райл» за такою схемою:

– головний вагон (ГВ100) завдовжки 28,8 м, маса порожнього вагона – 58,2 т, маса завантаженого вагона – 84,05 т;

– моторний вагон (МВ200) завдовжки 22,05 м, (2 моторних візки), маса порожнього вагона – 60,8 т, маса завантаженого вагона – 81,07 т;

– моторний вагон (МВ250) завдовжки 22,05 м (1 моторний візок), маса порожнього вагона – 52,2 т, маса завантаженого вагона – 76,47 т;

– головний вагон (ГВ150) завдовжки 28,8 м, маса порожнього вагона – 58,3 т, маса завантаженого вагона – 77,9 т.

Під час моделювання тягового та гальмівного режимів електропоїзда передбачено, що машиніст залежно від кута відхилення джойстика може реалізувати силу тяги або гальмівну силу різної величини.

У тяговому режимі максимальне відхилення джойстика машиніста становить  $35^\circ$ , а в гальмівному –  $47^\circ$ . Згідно з цим взято умовне позначення позицій, яке наведено в табл. 1. У чисельнику подано відповідні номери позицій для тягового, а в знаменнику – для гальмівного режимів.

Таблиця 1

**Відповідність кута відхилення джойстика машиніста умовному номеру позицій в тяговому та гальмівному режимах**

Table 1

**Correspondence of the driver's joystick deflection angle to the conditional position number in the traction**

Кут відхилення джойстика машиніста (градуси)	Номер позиції
7 / 9	1
14 / 18	2
21 / 27	3
28 / 37	4
35 / 47	5

Тягові та гальмівні характеристики моторних вагонів МВ–200 та МВ–250 представлено відповідно на рис. 2 і 3. Додатні значення сил відповідають тяговому режиму, а від’ємні – режиму гальмування.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

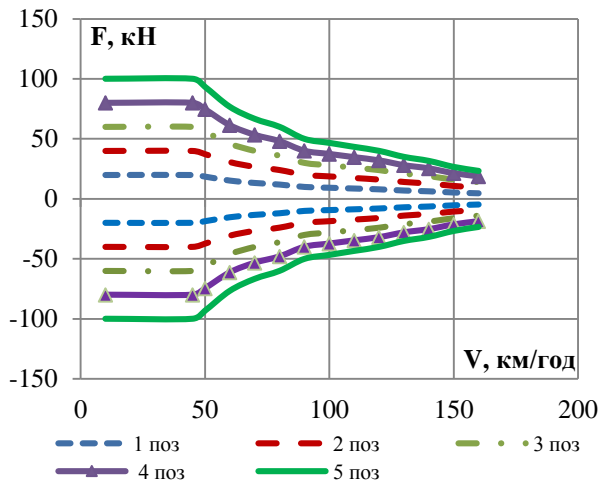


Рис. 2. Тягові / гальмівні характеристики моторного вагона МВ–250 електропоїзда ЕШ–2

Fig. 2. Traction / braking characteristics of the motor car MB–250 of the electric train ESh–2

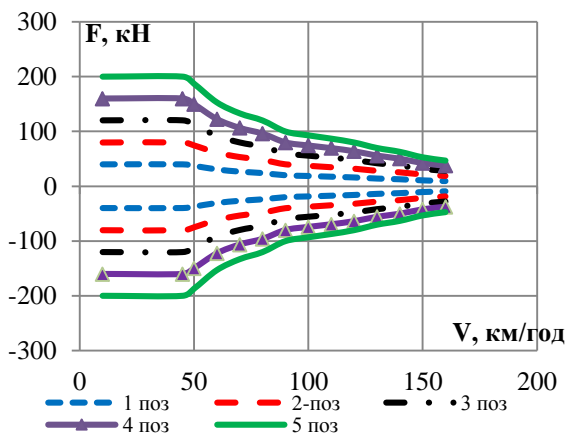


Рис. 3. Тягові / гальмівні характеристики моторного вагона МВ–200 електропоїзда ЕШ–2

Fig. 3. Traction / braking characteristics of the motor car MB–200 of the electric train ESh–2

Для оцінки величин поздовжніх прискорень вагонів пасажирських поїздів взято, що вони сформовані з чотиривісних спальних вагонів з одним електровозом AZ4, розташованим у голові поїзда. Передбачено також, що вагони обладнані розподільниками повітря з умов. № 292, увімкненими на короткоскладовий режим роботи, електроповітророзподільниками з умов. № 305, чавунними гальмівними колодками та модернізованими гумоометалевими поглинальними апаратами Р–5П. Комп'ютерне моделювання руху проведено для пасажирсь-

ких поїздів різної довжини (8–10 вагонів). Для порівняння розглянуто рух пасажирських поїздів із завантаженими та порожніми вагонами. Маса порожнього пасажирського вагона взято рівною 56 т, а завантаженого – 60 т.

Максимальний зазор у міжвагонному з'єднанні взято рівним 45 мм.

На рис. 4 і 5 наведено тягові та гальмівні характеристики пасажирського електровоза AZ4 відповідно.

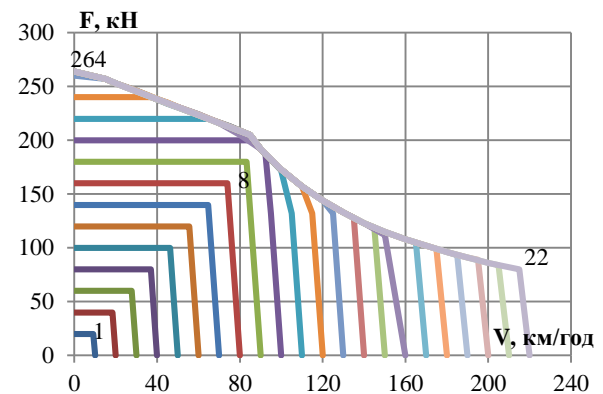


Рис. 4. Тягові характеристики електровоза AZ4

Fig. 4. Traction characteristics of the AZ4 electric locomotive

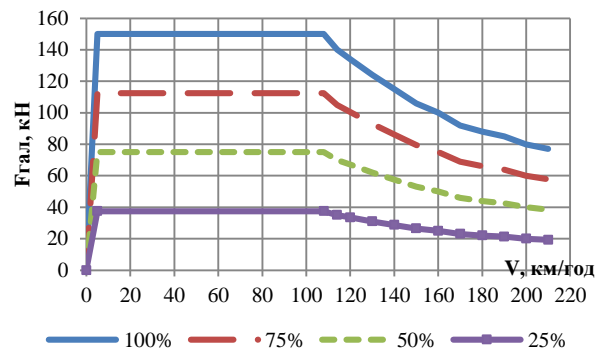


Рис. 5. Гальмівні характеристики електровоза AZ4

Fig. 5. Braking characteristics of the AZ4 electric locomotive

Силу основного опору поступальному руху пасажирських вагонів визначено за методикою, яка наведена в тягових розрахунках [2].

Силу основного опору поступальному руху двоповерхових вагонів виробництва «Штадлер Райл», із яких був сформований швидкісний електропоїзд ЕШ–2, визначено за формулою:

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$W_{0_i} = (2.273 \times 10^{-6} \times V_i^2 + 7.5 \times 10^{-3}) \times m_i, \quad (1)$$

де  $V_i$  – швидкість вагона км/год;  $m_i$  – маса вагона, т.

Сила опору від профілю та плану колії визначено за формулою:

$$W_{p_i} = \left(-j - \frac{200}{R} - 1.495 \frac{V_i^2}{R} + 9.197 \cdot H_r\right) \times 0.001 \times g \times m_i, \quad (2)$$

де  $j$  – величина ухилу, проміле (знак ухилу задають згідно з правилами тягових розрахунків: на спуску – зі знаком «-», на підйомі – зі знаком «+»);  $V_i$  – швидкість екіпажу;  $R$  – радіус колової кривої в плані;  $H_r$  – підвищення зовнішньої рейки. У наведеній формулі величини радіуса колової кривої та підвищення зовнішньої рейки змінюються на вхідний та вихідний кривих від нуля до заданого значення.

### Результати

Для підтвердження достовірності математичної моделі проведено порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. Як контрольовані параметри обрано максимальні поздовжні прискорення вагонів та гальмівні шляхи в разі екстреного гальмування.

На рис. 6 і 7 наведено порівняння розподілу максимальних поздовжніх прискорень вагонів по довжині поїзда, отриманих у результаті розрахунку, з аналогічними величинами, які було отримано під час експериментальних поїздок с пасажирськими поїздами із 10 завантажених вагонів за екстреного гальмування з початкових швидкостей 70 км/год та 75 км/год відповідно на різних ділянках залізниці. Взято, що до початку процесу гальмування величини зазорів у міжвагонних з'єднаннях мали випадковий розподіл.

На цих графіках і далі в тексті додатні значення прискорень – прискорювальні, від'ємні – уповільнювальні.

На наведених рисунках маркерами позначені максимальні значення прискорень, отримані в результаті експерименту, суцільними лініями – у результаті розрахунку.

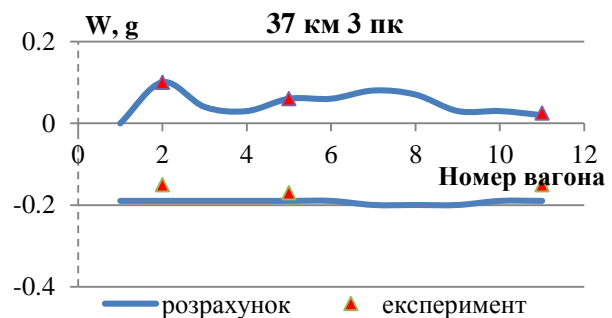


Рис. 6. Розподіл максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині пасажирського поїзда за екстреного гальмування з початкової швидкості 70 км/год

Fig. 6. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations of cars along the length of a passenger train during emergency braking from an initial speed of 70 km/h

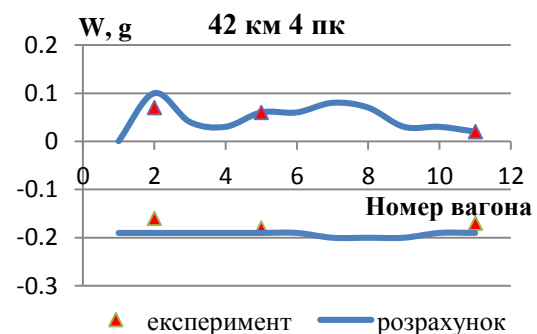


Рис. 7. Розподіл максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині пасажирського поїзда за екстреного гальмування з початкової швидкості 75 км/год

Fig. 7. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations of cars along the length of a passenger train during emergency braking from an initial speed of 75 km/h

Нижче в табл. 2 і 3 відповідно наведено порівняння величин гальмівних шляхів за екстрених гальмувань електропоїзда ЕШ–2 та пасажирських поїздів з різних початкових швидкостей руху, які отримано під час комп'ютерного моделювання та в результаті експериментальних поїздок на розглянутих ділянках залізниці.

Граничні значення гальмівних шляхів, які наведені в табл. 2, надано розробником електропоїздів «Штадлер Райл».

Таблиця 2

**Значення гальмівних шляхів за екстреного гальмування електропоїзда ЕШ–2 з різної початкової швидкості руху для завантажених та порожніх вагонів**

Table 2

**Values of braking distances during emergency braking of electric train ESh–2 with different initial speeds for loaded and empty cars**

V, км/год	100			120			140			160		
	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %
Завантажені	443	455	2,7	620	660	6,5	824	910	10	1 057	1 195	13
Порожні	451	460	2	630	670	6,3	838	922	10	1 073	1 209	13
Граничні значення		544			721			982			1 282	

Таблиця 3

**Значення гальмівних шляхів за екстреного гальмування пасажирського поїзда**

Table 3

**Braking distances for emergency braking of a passenger train**

	Гальмівний шлях, м	
	Координата шляху початку гальмування	37 км 3 пк
Початкова швидкість, км/год	75	70
Експеримент	355	525
Розрахунок	370	529

Аналіз наведених результатів на рис. 6 і 7 та в табл. 2 і 3 показує, що отримані результати комп'ютерного моделювання цілком задовільно (похибка не більше ніж 13 %) узгоджуються з результатами експериментів. Це дозволяє вва-

жати, що запропонована математична модель та її програмна реалізація досить близько відображають процеси, що відбуваються під час перехідних режимів руху в пасажирських поїздах та електропоїздах.

Нижче наведено дослідження поздовжньої динаміки електропоїздів та пасажирських поїздів за різних режимів керування поїздами. Також проаналізовано криві швидкості залежно від обраних режимів керування поїздами.

На рис. 9 і 10 подано результати математичного моделювання розгону порожнього та завантаженого електропоїздів ЕШ–2 зі станції Лякі на ділянці колії довжиною 1 300 м, поздовжній профіль якої зображено на рис. 8.



Рис. 8. Поздовжній профіль ділянки

Fig. 8. Longitudinal profile of the site

Режими ведення поїзда, наведені в табл. 4, обрано з умови розгону електропоїзда до 60–75 км/год за 2 хв.

Таблиця 4

**Режимна карта при розгоні  
електропоїзда ЕШ–2**

Table 4

**Mode map for acceleration  
of electric train ESh–2**

Інтервал часу з початку руху, сек	Номер тягової позиції джойстика
0	1
20	2
30	0 (вибіг)
50	1

На рис. 9 наведено графіки зміни швидкості руху електропоїзда залежно від часу ходу порожнього (суцільна лінія) та завантаженого (пунктирна лінія) електропоїздів у тяговому режимі. Маркерами на цьому графіку показані зміни режимів керування поїздом.

На рис. 10 зображено графік розподілу максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів у частках «g» по довжині порожнього та завантаженого електропоїздів. Суцільні лінії відповідають розподілу максимальних поздовжніх прискорень вздовж порожнього електропоїзда, а пунктирні – вздовж завантаженого електропоїзда.

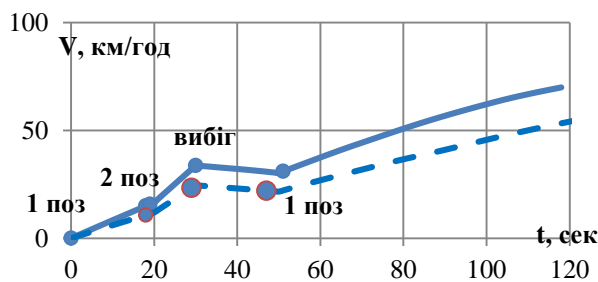


Рис. 9. Залежність швидкості руху від часу ходу порожнього та завантаженого електропоїздів

Fig. 9. Dependence of speed on running time of empty and loaded electric trains

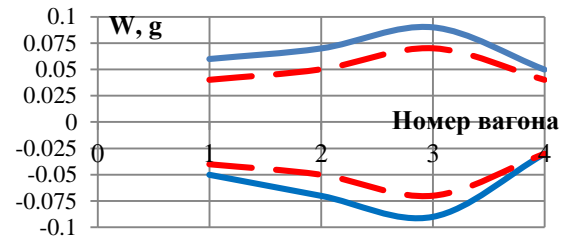


Рис. 10. Графік розподілу величин максимальних поздовжніх прискорень по довжині порожнього (суцільна лінія) та завантаженого (пунктирна лінія) електропоїздів у тяговому режимі

Fig. 10. Diagram of the distribution of maximum longitudinal accelerations along the length of an empty (solid line) and loaded (dashed line) electric train in traction mode

Як видно з графіка, наведеного на рис. 9, електропоїзд із порожніми вагонами, як і очікувалося, розігнався до більшої швидкості. Рівень найбільших поздовжніх прискорень (див. рис. 10) у порожньому електропоїзді виявився трохи вищим, ніж у завантаженому, але не перевищив допустимих прискорень  $0,5 g$  [3].

Як відомо, гальмівний режим є більш небезпечним із позиції рівня поздовжніх прискорень. Тому гальмування електропоїзда, особливо на ухилах великої довжини, розглянемо більш детально.

Проведемо комп'ютерне моделювання електродинамічного гальмування завантаженого електропоїзда ЕШ–2 з початкової швидкості руху  $50 \text{ км/год}$  на ділянці колії довжиною  $1600 \text{ м}$  з елементами поздовжнього профілю, які мають ухили до  $29$  проміле. Поздовжній профіль ділянки зображено на рис. 11.



Рис. 11. Поздовжній профіль ділянки

Fig. 11. Longitudinal profile of the site

У табл. 5 наведено режими керування електропоїздом для підтримки початкової швидкості руху  $50 \text{ км/год}$ . Координати шляху в цій та наступних таблицях відповідають реальному кілометражу розглянутих ділянок залізниці.

Таблиця 5

**Режимна карта завантаженого електропоїзда ЕШ–2 для підтримки швидкості руху 50 км/год на затяжному спуску в разі електродинамічного гальмування**

Table 5

**Mode map of a loaded electric train ESh–2 for maintaining a speed of 50 km/h on a long descent in case of electrodynamic braking**

Координата шляху, м	Номер гальмівної позиції
15 592	1
15 750	вибіг
16 050	1
16 300	2
16 500	вибіг
16 600	1
17 000	вибіг
17 192	Кінець розрахунку

На рис. 12 наведено графік зміни швидкості руху завантаженого електропоїзда залежно від координати шляху. Маркерами позначено режими керування електропоїздом.

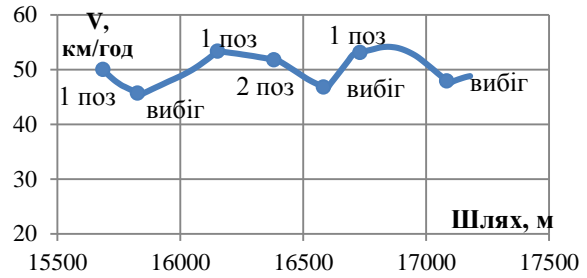


Рис. 12. Залежність швидкості руху завантаженого електропоїзда ЕШ–2 від координати шляху за електродинамічного гальмування

Fig. 12. Dependence of the speed of a loaded electric train ESh–2 on the coordinate of the path under electrodynamic braking

Із наведених результатів видно, що рекомендовані режими керування електропоїздом дають можливість підтримувати задану швидкість руху  $V = 50$  км/год на розглянутій ділянці залізниці.

На рис. 13 представлено осцилограми поздовжніх прискорень 1, 2 і 3-го екіпажів електропоїзда. Стрибки прискорень на осцилограмах зафіксовано в моменти зміни режимів керування електропоїздом.

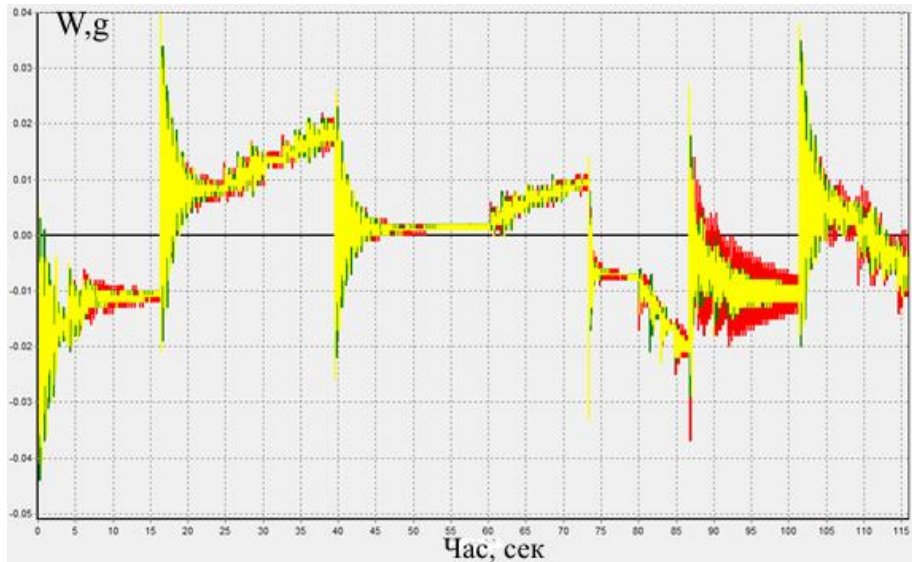


Рис. 13. Осцилограми поздовжніх прискорень вагонів завантаженого електропоїзда за електродинамічного гальмування

Fig. 13. Oscillograms of longitudinal accelerations of cars of a loaded electric train under electrodynamic braking

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Якщо за такою ж режимною картою вести порожній електропоїзд, це призведе до його зупинки в координаті шляху 16 200 м. Тому для підтримки швидкості 50 км/год електропоїзда з порожніми вагонами на розглянутій ділянці треба застосувати інші режими керування, які наведено в табл. 6.

Таблиця 6

**Режимна карта для підтриманні швидкості руху 50 км/год на затяжному спуску порожнього електропоїзду ЕШ–2 при електродинамічному гальмуванні**

Table 6

**Mode map for maintaining a speed of 50 km/h on a long descent of an empty electric train ESh–2 with electrodynamic braking**

Координата шляху, м	Номер гальмівної позиції
15 592	1
15 700	вибіг
16 000	1
17 000	вибіг
17 192	Кінець розрахунку

На рис. 14 наведено графік кривої швидкості руху порожнього електропоїзда залежно від координати шляху за електродинамічного гальмування.

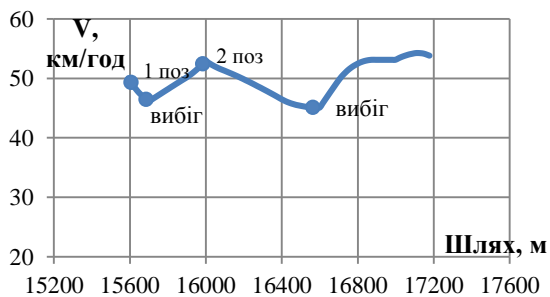


Рис. 14. Залежність швидкості руху порожнього електропоїзда ЕШ–2 від координати шляху за електродинамічного гальмування

Fig. 14. Dependence of the speed of an empty electric train ESh–2 on the coordinate of the path under electrodynamic braking

Як видно з наведеного графіка, запропоновані режими керування електропоїздом забезпечують підтримку швидкості руху 50 км/год.

На рис. 15 зображено графік зміни максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині електропоїзда, отримані за весь період моделювання руху електропоїздів за режимними картами, наведеними в табл. 5 і 6.

Суцільна лінія відповідає максимальним значенням поздовжніх прискорень порожніх вагонів, а пунктирна – завантажених вагонів.

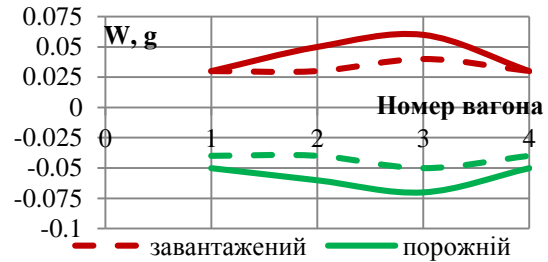


Рис. 15. Розподіл максимальних поздовжніх прискорень по довжині електропоїзда ЕШ–2 різної ваги за електродинамічного гальмування

Fig. 15. Distribution of maximum longitudinal accelerations along the length of electric train ESh–2 of different weights under electrodynamic braking

Як впливає з графіка, наведеного на рис. 15, рівень максимальних поздовжніх прискорень вагонів, що виникає в електропоїзді ЕШ–2 під час розглянутих режимів гальмування, не перевищує допустимого значення 0,5 g та забезпечує комфортність поїздки пасажирів.

Нижче розглянемо різні варіанти гальмування (електричне гальмування локомотивом, електропневматичне та пневматичне гальмування вагонів) порожнього та завантаженого пасажирських поїздів, сформованих із 10 вагонів, з різних початкових швидкостей руху ( $V_0 = 50$  км/год,  $V_0 = 80$  км/год, 110 км/год) на реальній ділянці колії довжиною 1 600 м, параметри якої наведено на рис. 11.

Для оцінки найбільших значень поздовжніх прискорень розглянуто гальмування попередньо зазначених пасажирських поїздів.

Як і раніше, режими керування поїздом обрано з умови підтримки початкової швидкості руху. Як контрольовані параметри обрано величини поздовжніх прискорень вагонів та криву швидкості руху.

У табл. 7 наведено режими керування поїздом у разі гальмування тільки електричними гальмами локомотива з початкової швидкості руху  $V_0 = 50$  км/год.

Таблиця 7  
**Режими керування пасажирським поїздом за електричного гальмування локомотивом**  
 Table 7  
**Modes of passenger train control with electric braking by a locomotive**

Координата шляху, м	Номер гальмівної позиції локомотива
15 592	1
15 800	2
16 100	3
16 400	4
16 800	3
17 000	2
17 192	Кінець розрахунку

Як приклад, на рис. 16 зображено розподіл найбільших значень поздовжніх прискорень по довжині порожнього та завантаженого пасажирських поїздів у разі електричного гальмування з початкової швидкості руху  $V_0 = 50$  км/год.

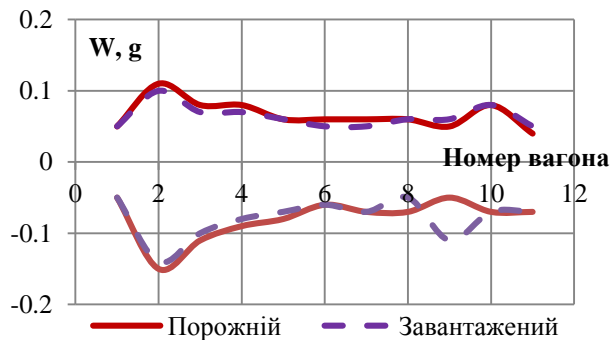


Рис. 16. Розподіл максимальних значень поздовжніх прискорень по довжині пасажирського поїзда за електричного гальмування локомотивом

Fig. 16. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations along the length of a passenger train under electric braking by a locomotive

Оскільки довжина пасажирського поїзда складала всього 10 вагонів, а маса завантаженого і порожнього вагонів відрізнялась на 9 %, то рівень найбільших поздовжніх прискорень у порожньому та завантаженому поїздах для розглянутої швидкості руху виявився майже однаковим за електричного гальмування локо-

мотивом. Тому надалі результати комп'ютерного моделювання наведено тільки для завантажених пасажирських поїздів.

У табл. 8 наведено режими керування поїздом за електропневматичного гальмування (ЕПГ) з початкової швидкості руху  $V_0 = 50$  км/год.

Таблиця 8  
**Режими керування пасажирським поїздом за електропневматичного гальмування**  
 Table 8  
**Modes of passenger train control with electropneumatic braking**

Координата шляху, м	Положення гальмівного крана
15 592	ЕПГ I ступінь
15 800	відпуск гальм
16 100	вибіг
16 400	ЕПГ I ступінь
17 000	відпуск гальм
17 192	Кінець розрахунку

На рис. 17 зображено розподіл найбільших значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині завантаженого пасажирського поїзда за електропневматичного гальмування з початкової швидкості руху  $V_0 = 50$  км/год.

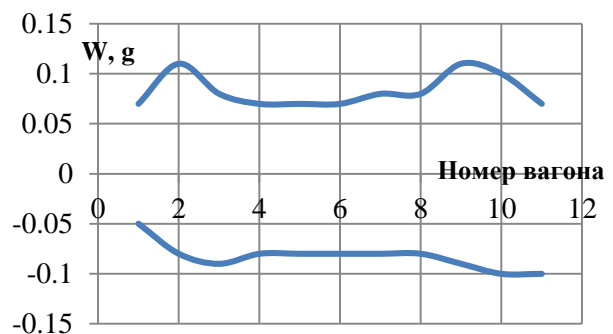


Рис. 17. Розподіл максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині завантаженого пасажирського поїзда за електропневматичного гальмування

Fig. 17. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations of cars along the length of a loaded passenger train under electropneumatic braking

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На рис. 18 і 19 наведено результати комп'ютерного моделювання пневматичного гальмування – регульовальні гальмування з розрядженням гальмівної магістралі на 0,06 МПа (СТ I – перший ступінь гальмування) або на 0,08 МПа (СТ II – другий ступінь гальмування) завантаженого пасажирського поїзда з різних початкових швидкостей руху на ділянці колії, параметри якої зображено на рис. 11.

Режими керування поїздом за пневматичного гальмування (ПГ) наведено у табл. 9.

На рис. 18 зображено залежності швидкості руху поїзда від координати шляху за пневматичного гальмування для різних початкових швидкостей руху (суцільна лінія –  $V_0 = 50$  км/год, пунктирна лінія –  $V_0 = 80$  км/год, штрихпунктирна лінія –  $V_0 = 110$  км/год). Маркерами на графіку показані режими керування поїздом.

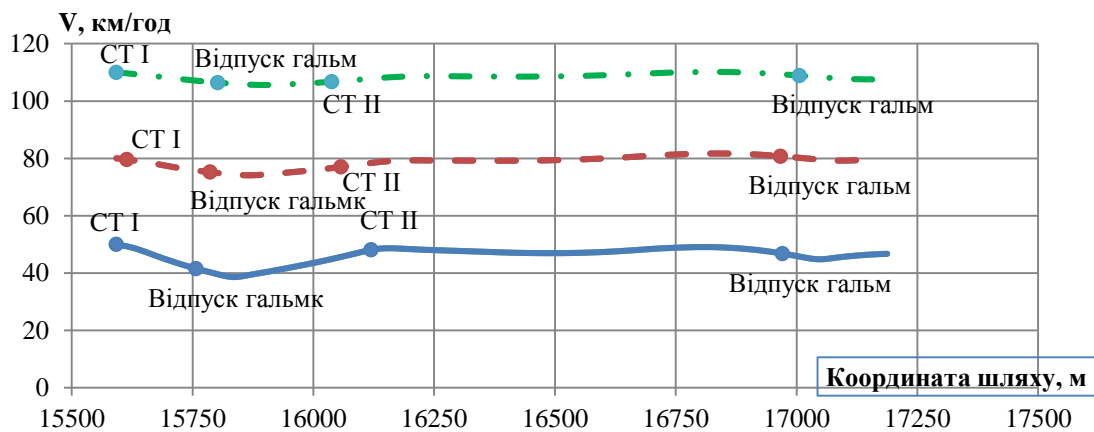


Рис. 18. Зміна кривої швидкості залежно від положення завантаженого пасажирського поїзда на ділянці колії за пневматичного гальмування з різних початкових швидкостей

Fig. 18. Change in the speed curve depending on the position of a loaded passenger train on the track section under pneumatic braking from different initial speeds

Як видно з наведених графіків, запропоновані режими керування пасажирським поїздом дають змогу підтримувати початкову (задану) швидкість руху на складній ділянці поздовжнього профілю з довгим спуском та великими ухилами.

На рис. 19 наведено графіки розподілу максимальних значень поздовжніх прискорень за довжиною завантаженого пасажирського поїзда

в разі регульовального гальмування з різних початкових швидкостей гальмування.

Як видно з графіка, наведеного на рис. 19, найбільше значення поздовжніх прискорень отримано за максимальної швидкості руху 110 км/год, що виникає в останньому вагоні.

Таблиця 9

## Режими керування пасажирським поїздом за пневматичного гальмування

Table 9

## Modes of passenger train control with pneumatic braking

Координата шляху, м	Положення гальмівного крана
15 592	СТ I
15 800	відпуск гальм
16 100	СТ II
17 000	відпуск гальм
17 192	Кінець розрахунку

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

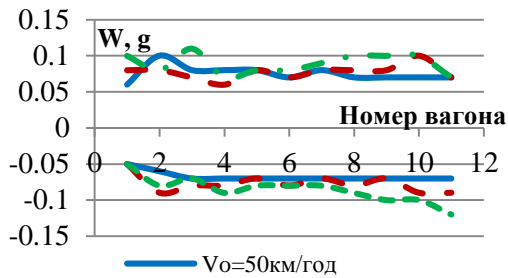


Рис. 19. Розподіл максимальних поздовжніх прискорень вагонів по довжині завантаженого пасажирського поїзда за регульовального гальмування з різних початкових швидкостей руху

Fig. 19. Distribution of maximum longitudinal accelerations of cars along the length of a loaded passenger train under control braking from different initial speeds

Нижче в табл. 10 наведено значення найбільших додатних та від'ємних прискорень вагонів за різних режимів гальмування (електричного, електропневматичного та пневматичного) для завантаженого (чисельник) та порожнього (знаменник) пасажирських поїздів із різних початкових швидкостей руху на ділянці колії, зображеної на рис. 11. Режими керування поїздом за електричного, електропневматичного та пневматичного гальмування зазначено в табл. 7, 8 і 9 відповідно. У всіх випадках проведено моделювання на ділянці колії довжиною 1 600 м. У таблиці зазначено також час ходу на розглянутій ділянці.

Таблица 10

**Значення найбільших поздовжніх прискорень (у частках «g») для різних видів гальмування пасажирського поїзда з різних початкових швидкостей руху**

Table 10

**Values of the largest longitudinal accelerations (in fractions of «g») for different types of braking of a passenger train from different initial speeds**

Вид гальмування	Електричне			Електропневматичне			Пневматичне		
	$V_0$ , км/год	50	80	110	50	80	110	50	80
Час ходу, сек	121	75	54	119	71	52	128	73	53
	126	76	55	123	72	53	132	74	53
$W_{max}$ , g	0,1	0,09	0,09	0,11	0,12	0,11	0,18	0,34	0,38
	0,11	0,1	0,1	0,11	0,13	0,12	0,08	0,1	0,11
$W_{min}$ , g	-0,14	-0,15	-0,14	-0,1	-0,11	-0,13	-0,13	-0,35	-0,37
	-0,15	-0,15	-0,15	-0,11	-0,12	-0,12	-0,07	-0,09	-0,12

З наведеної таблиці видно, що рівень найбільших поздовжніх прискорень зростає зі збільшенням початкової швидкості руху та досягає найбільшого значення в разі пневматичного гальмування, але не перевищують допустимих значень 0,5 g.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що запропоновані режими керування пасажирськими поїздами можуть бути застосовані на розглянутій ділянці залізниці для підтримання заданої (початкової) швидкості руху.

Під час руху поїздів у тяговому режимі питання про поздовжню динаміку не настільки актуальне, як під час гальмування. Але в разі руху в тяговому режимі по довгому підйому з ухилом майже 30 ‰ може постати питання, яким чином керувати поїздом, щоб на підйомі такої величини не втратити дільничну швидкість.

Нижче проведено комп'ютерне моделювання тягового режиму завантажених пасажирських поїздів на затяжному підйомі з ухилом 29,89 ‰ довжиною 1 300 м. Розглянуто рух за-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вантажених пасажирських поїздів різної довжини (10, 9 або 8 вагонів). Номер тягової позиції зазначено в табл. 11.

Як контрольовані параметри взято швидкість руху поїздів та величини поздовжніх прискорень вагонів.

Таблиця 11

Режимна карта руху в тяговому режимі завантаженого пасажирського поїзда

Table 11

Traffic mode map in the traction mode of a loaded passenger train

Координата шляху, м	Номер тягової позиції
35 400	18
35 800	20
36 200	22
36 800	Кінець розрахунку

Для оцінки величин найбільших поздовжніх прискорень взято, що в початковий момент руху величини зазорів у міжвагонних з'єднаннях мали випадковий розподіл.

Початкову швидкість руху взято рівною 84 км/год. Залежність значень швидкості руху від координати шляху для розглянутих пасажирських поїздів наведено на рис. 20. Маркерами на вказаних графіках зазначено номери тягових позицій.

На рис. 21 зображено розподіл максимальних прискорень по довжині поїзда в тяговому режимі.

На наведених рисунках суцільні лінії відповідають результатам моделювання поїзда з 10 вагонів, пунктирні – поїзда з 9 вагонів, штрих пунктирні – поїзда з 8 вагонів.

Із результатів, наведених на рис. 20, як і слід було очікувати, видно, що зниження маси поїзда (за рахунок кількості вагонів) дозволить збільшити швидкість руху на розглянутій ділянці колії. При цьому для підтримки швидкості руху близько 84 км/год наприкінці затяжного підйому в поїзді з 10 вагонів необхідний більш потужний локомотив. У поїзді з 9 вагонів швидкість руху наприкінці затяжного підйому не знизилася нижче 82 км/год, а в поїзді, який складався з 8 вагонів, швидкість руху незначно

збільшилась (відхилення від заданої швидкості склало 4 %).

Рівень найбільших поздовжніх прискорень, що виникає в розглянутих поїздах (див. рис. 21), виявився практично однаковим та безпечним для пасажирів.

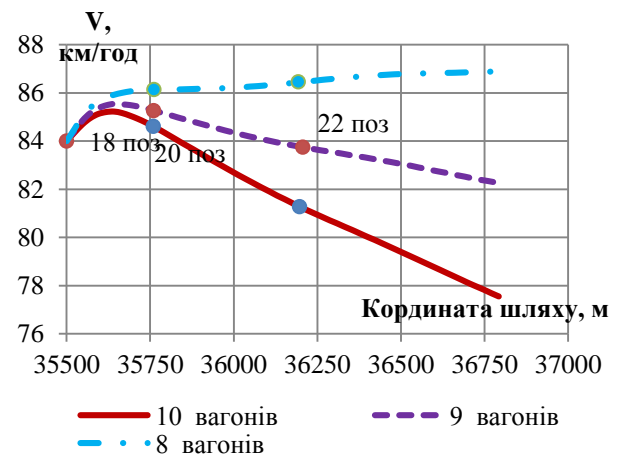


Рис. 20. Зміна кривої швидкості залежно від положення завантажених пасажирських поїздів на ділянці колії в тяговому режимі

Fig. 20. Change in the speed curve depending on the position of loaded passenger trains on the track section in traction mode

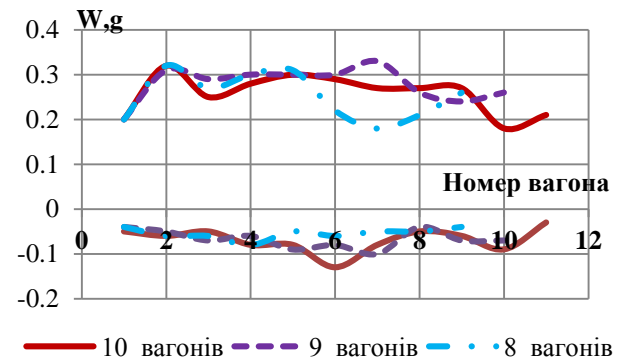


Рис. 21. Розподіл максимальних поздовжніх прискорень по довжині завантаженого пасажирського поїзда в тяговому режимі

Fig. 21. Distribution of the maximum longitudinal prime roots along the length of a loaded passenger train in traction mode

### Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше запропонували математична модель силової характеристики модернізованого поглинального апарату Р–5П, яким оснащені пасажирські вагони на Азербайджанській залізниці. Проведено апробації запропонованої математичної моделі шляхом порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними. За контрольованв параметри обрано значення найбільших поздовжніх прискорень вагонів та гальмівні шляхи.

Надано рекомендації щодо керування електропоїздами «Штадлер» та пасажирськими поїздами на окремих ділянках Азербайджанської залізниці, які вводять в експлуатацію, для підтримки заданої швидкості руху.

### Висновки

1. Досліджено поздовжню навантаженість електропоїздів та пасажирських поїздів для різних режимів ведення з різними швидкостями

руху. Розглянуто пасажирські поїзди різної довжини (8, 9 і 10 вагонів) та різної ваги (порожні та завантаженні).

2. Надані рекомендації з керування рухом електропоїзда ЕШ–2 та пасажирським поїздом на реальних ділянках колії Азербайджанської залізниці для підтримки заданої швидкості руху. Проаналізовано криві швидкості руху поїздів та величини поздовжніх прискорень вагонів для запропонованих режимів керування поїздами.

3. Для розглянутих режимів ведення поїздів зі швидкостями руху в діапазоні 50–110 км/год на розглянутих ділянках колії рівень величин поздовжніх прискорень вагонів у пасажирських поїздах та в електропоїзді не перевищував допустимих значень 0,5 g. Таким чином, запропоновані режими керування рухом можуть бути застосовані машиністами на розглянутих ділянках Азербайджанської залізниці для підтримки заданої швидкості руху.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блохин Е. П., Железнов К. И., Урсуляк Л. В. Вычислительный комплекс для решения задач безопасности и устойчивости движения подвижного состава железных дорог. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. № 18. Вип. 18. С. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2007/17457>
2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги*: підручник. Дніпро : Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2022. 385 с.
3. Blochinas E., Dailydka S., Lingaitis L., Ursuliak L. *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai*. Vilnius: Technika, 2015. 168 с.
4. Bosso N., Zampieri N. Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig. *Vehicle System Dynamics*. 2012. № 51 (4). С. 517–541. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.750001>
5. Liu K., Wang Z., Liu P., Liu G., Wang Y., Zhang W. A heavy-haul train longitudinal-vertical coupled dynamics model and its dynamic behaviour under emergency braking. *Vehicle System Dynamics*. 2024. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2353705>
6. Liu W., Su S., Tang T., Cao Y. Study on longitudinal dynamics of heavy haul trains running on long and steep downhills. *Vehicle System Dynamics*. 2021. Vol. 60. Iss. 12. P. 4079–4097. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1998559>
7. Pogorelov D., Yazykov V., Lysikov N., Oztemel E., Arar O. F., Rende F. S. Train 3D: the technique for inclusion of three-dimensional models in longitudinal train dynamics and its application in derailment studies and train simulators. *Vehicle System Dynamics*. 2017. Vol. 55. Iss. 4. P. 583–600. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1273532>
8. Pshinko O. M., Ursulyak L. V., Zhelieznov K. I., Shvets A. O. To the problem of train running safety. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. Iss. 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012014>
9. Pshinko O., Ursulyak L., Kostrytsia S., Fedorov Y., Shvets A. The influence of the «train-track» system parameters on the maximum longitudinal forces level. *Transport Problems*. 2019. Vol. 14. Iss. 4. P. 161–172. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.4.14>

10. Serajian R., Mohammadi S., Nasr A. Influence of train length on in-train longitudinal forces during brake application. *Vehicle System Dynamics*. 2018. Vol. 57. Iss. 2. P. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1456667>
11. Ursulyak L., Zheleznov K. Simulation of Braking Processes in Freight Trains. *Transport Means 2022. Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (Kaunas, 05–07 Oct., 2022). Kaunas, 2022. P. 788–791.
12. Wu Q., Cole C., Spiryagin M., Chang C., Wei W., Ursulyak L., ... Cantone L. Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 1–49. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808>
13. Wu Q., Spiryagin M., Cole C., McSweeney T. Parallel computing in railway research. *International Journal of Rail Transportation*. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 111–134. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1553115>

L. V. URSULYAK<sup>1\*</sup>, O. O. BOLOTOV<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Technical Mechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lasaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 286 63 49, e-mail [lydm.urs@gmail.com](mailto:lydm.urs@gmail.com), ORCID 0000-0001-5957-6926

<sup>2\*</sup>Dep. «Technical Mechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lasaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 977 57 08, e-mail [o.o.bolotov@ust.edu.ua](mailto:o.o.bolotov@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-0807-0340

## Study of the Longitudinal Dynamics of Passenger Trains to Provide Recommendations for Their Control on New Sections of the Azerbaijan Railways

**Purpose.** In order to organize safe, longitudinal dynamics, train traffic on the sections of the Azerbaijan Railways that are being put into operation, the paper provides recommendations for controlling the movement of passenger trains and electric trains to realize the maximum possible speed, taking into account the technical capabilities of locomotives and the parameters of the longitudinal profile. **Methodology.** The estimation of the largest values of longitudinal accelerations was performed by means of computer modeling of longitudinal oscillations of passenger trains while they are moving at different speeds in areas with the most unfavorable parameters of the profile and track plan, which are superimposed on the train disturbances caused by the driver's actions to control its movement. The paper presents mathematical modeling of the force characteristics of inter-car connections of passenger cars equipped with modernized rubber-metal absorbing devices. To confirm the validity of the mathematical model, the maximum values of longitudinal accelerations of cars and braking distances obtained as a result of mathematical modeling of passenger trains were compared with similar values obtained during experimental trips. **Findings.** Using computer modeling of longitudinal train oscillations, diagrams of the distribution of the largest longitudinal accelerations along the length of trains with different numbers of cars, the magnitude of braking distances, and braking times were obtained. For the proposed modes of train control, the dependence of the speed on the track coordinate is analyzed. It is noted that for the considered modes of operation of passenger trains and electric trains with the specified speeds on certain sections of railways, the level of longitudinal accelerations of cars does not exceed the values that will affect the safety of train traffic and the comfort of passenger travel. **Originality.** For the first time, the authors proposed a mathematical model of the power characteristic of the modernized absorber apparatus, which is used in passenger cars on the Azerbaijan Railways. The longitudinal load of electric trains and passenger trains, as well as speed curves in different modes of train operation on certain sections of the Azerbaijan Railways were investigated. **Practical value.** Based on the results obtained, recommendations for controlling the movement of passenger trains on real track sections to maintain a given speed, taking into account the technical capabilities of locomotives and longitudinal profile parameters, were provided.

**Keywords:** longitudinal accelerations; railway transport; longitudinal profile parameters; train speed; control implementation; braking distance

### REFERENCES

1. Blokhin, Y. P., Zheleznov, K. I., & Ursuliak, L. V. (2007). Computing complex for solving problems of safety and stability of the movement of rolling stock of railways. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 18(18), 106–114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2007/17457> (in Russian)

2. Bobyr, D., Grischenko, N., & Serdyuk, V. N. (2022). The theory of locomotive traction. *Dnipro: Educational and scientific institute «Dnipro Institute of Infrastructure and Transport»*. (in Ukrainian)
3. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L., & Ursuliak, L. (2015). *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukiniu judėjimo režimai*. Vilnius: Technika. (in Lithuanian)
4. Bosso, N., & Zampieri, N. (2012). Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig. *Vehicle System Dynamics*, 51(4), 517-541. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.750001> (in English)
5. Liu, K., Wang, Z., Liu, P., Liu, G., Wang, Y., & Zhang, W. (2024). A heavy-haul train longitudinal-vertical coupled dynamics model and its dynamic behaviour under emergency braking. *Vehicle System Dynamics*, 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2353705> (in English)
6. Liu, W., Su, S., Tang, T., & Cao, Y. (2021). Study on longitudinal dynamics of heavy haul trains running on long and steep downhills. *Vehicle System Dynamics*, 60(12), 4079-4097. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1998559> (in English)
7. Pogorelov, D., Yazykov, V., Lysikov, N., Oztemel, E., Arar, O. F., & Rende, F. S. (2017). Train 3D: the technique for inclusion of three-dimensional models in longitudinal train dynamics and its application in derailment studies and train simulators. *Vehicle System Dynamics*, 55(4), 583-600. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1273532> (in English)
8. Pshinko, O. M., Ursulyak, L. V., Zhelieznov, K. I., & Shvets, A. O. (2020). To the problem of train running safety. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985(1), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012014> (in English)
9. Pshinko, O., Ursulyak, L., Kostrytsia, S., Fedorov, Y., & Shvets, A. (2019). The influence of the «train-track» system parameters on the maximum longitudinal forces' level. *Transport Problems*, 14(4), 161-172. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.4.14> (in English)
10. Serajian, R., Mohammadi, S., & Nasr, A. (2018). Influence of train length on in-train longitudinal forces during brake application. *Vehicle System Dynamics*, 57(2), 192-206. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1456667> (in English)
11. Ursulyak, L., & Zheleznov, K. (2022, Oct.). Simulation of braking processes in freight trains. In *Transport Means 2022: Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (pp. 788-791). (in English)
12. Wu, Q., Cole, C., Spiriyagin, M., Chang, C., Wei, W., Ursulyak, L., ... Cantone, L. (2021). Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, 11(1), 1-49. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808> (in English)
13. Wu, Q., Spiriyagin, M., Cole, C., & McSweeney, T. (2018). Parallel computing in railway research. *International Journal of Rail Transportation*, 8(2), 111-134. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1553115> (in English)

Надійшла до редколегії: 04.11.2024

Прийнята до друку: 24.03.2025

# ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 656.223.078.1:338.24-047.44

В. К. МИРОНЕНКО<sup>1\*</sup>, Я. О. ЗЮБРИК<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. управління комерційною діяльністю залізниць, Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, вул. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 111 85 26, ел. пошта pupil7591@gmail.com, ORCID 0000-0002-6088-3867

<sup>2\*</sup>Каф. управління комерційною діяльністю залізниць, Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, вул. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +48 (790) 645 416, ел. пошта yarek049@gmail.com, ORCID 0009-0003-4078-0611

## Оцінка прогнозованого вантажопотоку інтер- / мультимодального транспортно-логістичного центру

**Мета.** Дослідження спрямовано на отримання нових знань про закономірності формування вантажопотоків, які генерують (індукують) під час створення транспортно-логістичних центрів, що обслуговують мультимодальні перевезення вантажів, із використанням продуктів і сервісів наукометричних баз даних. Хронологічні рамки досліджуваних джерел – 2010–2024 рр. **Методика.** Для отримання релевантних емпіричних даних автори провели огляд літератури та офіційних вебсайтів транспортно-логістичних центрів (ТЛЦ) країн ЄС, що відображають дані про їх інфраструктуру та обсяги роботи під час обслуговування різних видів транспорту. **Результати.** У ході роботи встановлено що: 1) досліджувана множина ТЛЦ країн ЄС може бути кластеризована за показником співвідношення «площа ТЛЦ, га – генерований річний вантажопотік з одиниці площі ТЛЦ, т/(м<sup>2</sup>-рік)»; 2) умовно можна виділити кластери великих, малих та середніх (за площею) ТЛЦ; 3) як правило, малі ТЛЦ генерують більший вантажопотік з одиниці площі, що ставить мету для наступних досліджень – визначення оптимальної площі та інших параметрів ТЛЦ за критерієм його максимальної питомої продуктивності з одиниці площі. **Наукова новизна.** Автори вперше отримали кількісні залежності співвідношення показників «площа ТЛЦ, га – генерований річний вантажопотік з одиниці площі ТЛЦ, т/(м<sup>2</sup>-рік)», що мають характер спадної степеневі функції для малих та середніх ТЛЦ та спадної лінійної функції для великих (за площею) ТЛЦ. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна прогнозувати розміри генерованого вантажопотоку залежно від обраних проектних рішень під час створення нових ТЛЦ, що підвищить достовірність техніко-економічних обґрунтувань відповідних інвестиційних проєктів. Дані дослідження також можуть бути корисними в навчальному процесі за напрямками «Залізничний транспорт», «Транспортні технології», «Будівництво та проектування транспортної інфраструктури», під час вивчення дисциплін «Мультимодальні вантажні перевезення», «Логістика міжнародних перевезень вантажів», організації науково-практичних семінарів, курсів підвищення кваліфікації тощо.

**Ключові слова:** мультимодальні перевезення; інтермодальні перевезення; транспортно-логістичний центр; генерований вантажопотік; індукований вантажопотік

### Вступ

В економіці відоме явище «індукований попит», за якого збільшення пропозиції призводить до зниження ціни та зростання споживання. Інакше кажучи, коли товар чи послуга стають більш масовими й доступними, їхня ціна падає, і споживачі швидше за все купуватимуть їх, а це означає, що попит поступово зростає.

Оскільки транспортна послуга також є товаром, то це явище стосується і транспортного ринку, але в транспортній термінології прийнято називати ці додаткові вантажопотоки такими, які генерують, генерованими. Так, відкриття нового промислового підприємства, розвиток об'єкта транспортної інфраструктури генерує додаткові потоки вантажів.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Угода про асоціацію між Україною та ЄС [8], Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [6], рішення Єврокомісії [1, 7] щодо продовження основних транспортних коридорів Транс'європейської транспортної мережі TEN-T на територію України та сусідньої Молдови, розвиток міжнародних мультимодальних перевезень у взаємодії залізниць України (колії 1 520 мм) із залізницями ЄС (колії 1 435 мм) та іншими видами транспорту спонукають до створення на базі залізничної мережі нових інтер-/мультимодальних транспортно-логістичних центрів (хабів), де, власне, ця взаємодія і відбувається.

Створення мережі інтермодальних терміналів (ІМТ) на базі інфраструктури залізниць буде сприяти генерації вантажопотоків, що рухаються до / від найзручнішого для вантажовласника терміналу автомобільним транспортом, та оживить так звані малодіяльні лінії залізниць. До таких малодіяльних ліній належать, за різними оцінками, 50–70 % протяжності залізниць України.

Стаття присвячена оцінці прогнозованого вантажопотоку інтер-/мультимодального транспортно-логістичного центру, який ще не споруджено, на стадії передпроектних досліджень (pre-feasibility study). Задача достатньо складна, і попередні дослідження інших авторів у межах останніх 10 років лише підводять до пошуку розв'язку цієї задачі, але ще не дають його.

Зокрема, С. В. Ільченко та ін. [5] досліджують питання державного регулювання мультимодальних перевезень вантажів, що, безумовно, є важливим аспектом, але лише опосередковано стосується теми нашого дослідження.

Yu. V. Shuldiner, Н. О. Prymachenko, S. V. Petryk, G. S. Pashchenko [9] аналізують сучасний стан та перспективи розвитку мультимодальних перевезень в Україні, враховуючи історичні аспекти та ключові тенденції розвитку глобального логістичного ринку, що не може бути безпосередньо застосовано для прогнозування обсягу роботи конкретного терміналу на стадії його проектування.

У колективній монографії [4], що розглядає використання логістики для поліпшення показників вантажних залізничних перевезень, а також організаційно-технологічні аспекти мультимодальних перевезень у міжнародному сполученні, запропоновано концепцію використання

логістики як основи поліпшення показників вантажних залізничних перевезень, наведено результати досліджень екологічної безпеки та енергетичних показників транспортних засобів, розроблено автоматизовану технологію управління вагонопотоками під час здійснення міжнародних перевезень, наведено організаційно-технологічні аспекти мультимодальних перевезень та запропоновано шляхи розвитку інтермодальних перевезень в умовах України та в міжнародному сполученні, однак не розглянуто питання прогнозування обсягів роботи мультимодальних терміналів.

Л. А. Гужевська та О. В. Денис [2] розглядають сучасні проблеми організації мультимодальних перевезень, зокрема організацію процесу доставки та формування транспортно-технологічної схеми з визначенням усіх її параметрів, вибір вантажної одиниці для таких перевезень як один із важливих елементів процесу планування доставки. Розроблено модель вибору вантажної одиниці мультимодального перевезення. Вона містить такі основні параметри, як довжина ділянок, перевезення по яких виконують різними видами транспорту, і тарифи, але не стосується роботи вантажних терміналів.

Комплексний огляд інтермодальних вантажних перевезень та логістики з урахуванням інфраструктури, операцій та політики, що впливають на ефективність і стійкість інтермодальних транспортних систем, надає книга [16], але вона є скоріше практичним посібником і не може бути використано для прогнозування обсягів роботи терміналів.

Змістовна книга про інтермодальні вантажні термінали та структуру управління їхнім життєвим циклом [15] пропонує рамкову модель управління життєвим циклом інтермодальних вантажних терміналів, підкреслюючи важливість стратегічного планування та управління для забезпечення їхньої довгострокової ефективності та стійкості, але питання прогнозування вантажопотоку мультимодального терміналу в ній не розглянуто.

### Мета

Постає питання: як оцінити потенційний вантажопотік, що його генерує новостворений ІМТ? Отримання методу такої оцінки і є основною метою нашого дослідження.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Воно не тільки теоретичне, але й практичне, адже від потужності цього вантажопотоку залежать, з одного боку, параметри ІМТ, інвестиції в його створення, витрати на експлуатацію, а з іншого – доходи операторів терміналу, перевізників, місцевого та державного бюджетів, за рахунок яких ці інвестиції окупаються, а експлуатаційні витрати покриваються.

## Методика

Щоб відповісти на це питання, недостатньо застосувати суто теоретичні методи прогнозування вантажопотоків, такі як регресійний аналіз, гравітаційний метод тощо.

Індуковані вантажопотоки як явище досліджували і раніше, зокрема під час розроблення стратегії ЄС для логістики вантажних перевезень [4].

Згідно з дослідженнями про вплив транспортно-логістичних центрів на соціально-економічну сферу та довкілля [9], у країнах ЄС у середньому ТЛЦ має такі показники ефективності (див. рис. 1 нижче):

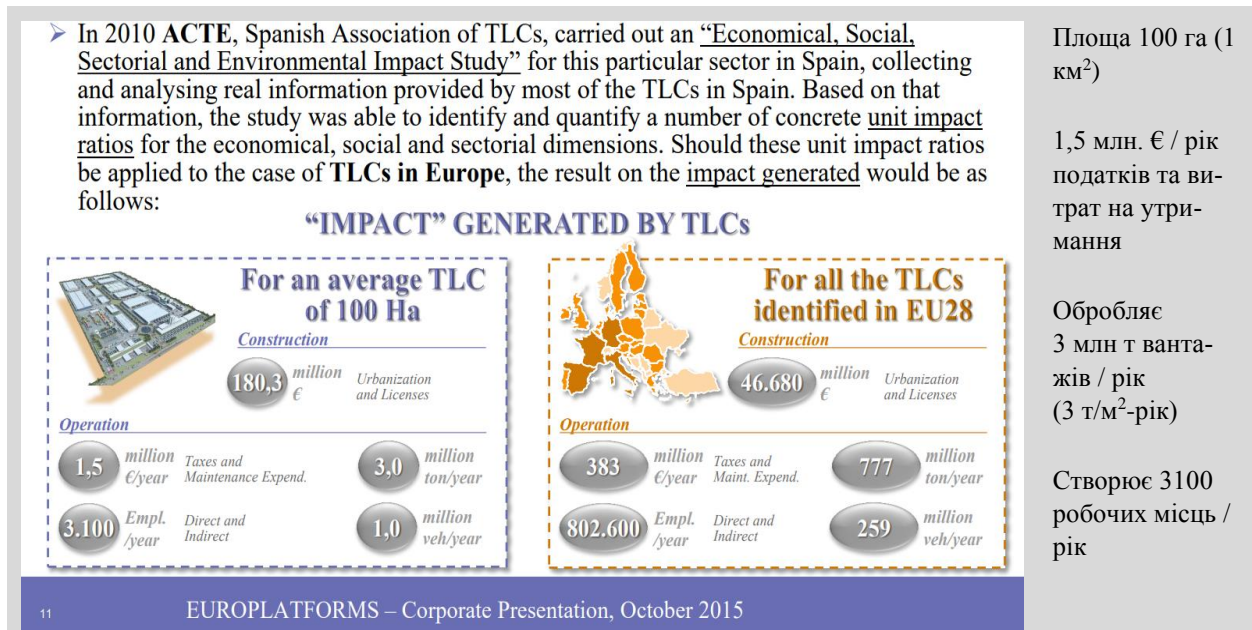


Рис. 1. Фрагмент презентації щодо впливів ТЛЦ на суспільство, економіку та довкілля

Fig. 1. Fragment of the presentation on the impact of TLC on society, economy and environment

Ми застосували та вдосконалили цей підхід: використали реальні дані наявних ІМТ європейських країн, завдяки чому вдалося знайти кореляційні залежності між переробною спроможністю та розмірами (площею) ІМТ.

На підставі даних дослідження [10], а також інформації з електронних ресурсів [11–14] складено зведену табл. 1 і 2.

Відзначимо, що ці термінали, розташовані вздовж Північноморсько-Балтійського коридору TEN-T, значно менші, ніж у середньому по Європі.

Найвищий у європейському рейтингу Interporto Verona (Італія) займає площу 250 га

і щорічно обробляє понад 8 млн т вантажів автомобільного транспорту та 20 млн т – залізничного транспорту, що дає показник 11,2 т/м<sup>2</sup>-рік [3]. В Італії, як і взагалі в Європі та світі, немає єдиної системи показників інтермодальних терміналів, тому табл. 2, у якій наведено показники терміналів Італії та середні по країнах ЄС, дещо відрізняється за структурою від табл. 1 (деякі термінали не наводять показників, які містяться в табл. 1, тому їх доводиться отримувати розрахунковим шляхом, використовуючи середнє завантаження інтермодальної транспортної одиниці, взяте як 18 т.

**Показники інтермодальних вантажних терміналів, розташованих уздовж  
Північноморсько-Балтійського коридору TEN–T**

Table 1

**Performance of intermodal cargo terminals located along the North Sea-Baltic TEN–T corridor**

№	Інтермодальний термінал	Площа, га	Переробна спроможність			
			(вантажних одиниць на рік – ВО*/рік)	ВО/рік-га	т/рік-га	т/рік-м <sup>2</sup>
1	DUSS-terminal Hamburg Billwerder	30	370 000	12 333	222 000	22,2
2	DUSS-terminal Großbeeren	8	75 000	9 375	168 750	16,9
3	Metrans HUB terminal Poznań	40,5	385 400	9 516	171 289	17,1
4	CLIP Container terminal Swarzędz	10	75 000	7 500	135 000	13,5
5	Spedcont container terminal Łódź	14,6	80 000	5 479	98 630	9,9
6	Metrans Intermodal terminal Pruszków	14	96 000	6 857	123 429	12,3
7	Vilnius intermodal terminal	54	100 000	1 852	33 333	3,3
8	Kaunas intermodal terminal	40	55 000	1 375	24 750	2,5
9	Kuovola rail-road terminal	170	250 000	1 471	26 471	2,6

\*Примітка: ВО – вантажна одиниця

Під вантажними одиницями (ВО) тут маються на увазі інтермодальні транспортні одиниці – контейнери, контрейлері (автопоїзди на платформах), змінні кузови, напівпричеви. Для перерахунку обсягів переробки вантажів на терміналах у тонни взято середнє для усіх ВО завантаження 18 т.

Таблиця 2

**Показники інтермодальних терміналів Італії (Interporto...) та середні по країнах ЄС**

Table 2

**Performance of intermodal terminals in Italy (Interporto...) and the average for EU countries**

№	Інтермодальний термінал	Площа, га	Переробна спроможність				
			млн ВО*/рік	млн т/рік	ВО/рік-га	т/рік-га	т/рік-м <sup>2</sup>
1	Verona [2]	250	1,56	28	6 220	112 000	11,2
2	Nola (Campagna) [10]	200	1,67	33	8 340	150 000	16,5
3	Bologna [9]	24,6	0,1	1,8	4 070	73 200	7,32
4	У середньому по ЄС	100	–	3,0	–	–	3,00

\*Примітка: ВО – вантажна одиниця

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Результати**

На основі виконаних досліджень ми пропонуємо узагальнений показник, що дозволить певним чином класифікувати та порівнювати термінали між собою. Назвемо цей показник «питома річна продуктивність терміналу, тонн на рік на 1 м<sup>2</sup> площі – т/рік-м<sup>2</sup>».

Табл. 1 і 2 використаємо для пошуку кореляційної залежності між площею, яку займає інте-

рмодальний термінал (ІМТ) –  $S_{\text{ІМТ}}$ , та його питомою продуктивністю  $p_{\text{ІМТ}}$ . Така залежність (якщо вона існує), потрібна для того, щоб можна було оцінити, який вантажопотік може обробити (згенерувати) цей ІМТ, за формулою:

$$Q_{\text{ІМТ}} = S_{\text{ІМТ}} p_{\text{ІМТ}} \quad (1)$$

Узагальнення даних табл. 1 та 2 та їх оброблення дає результати, показані на рис. 2.

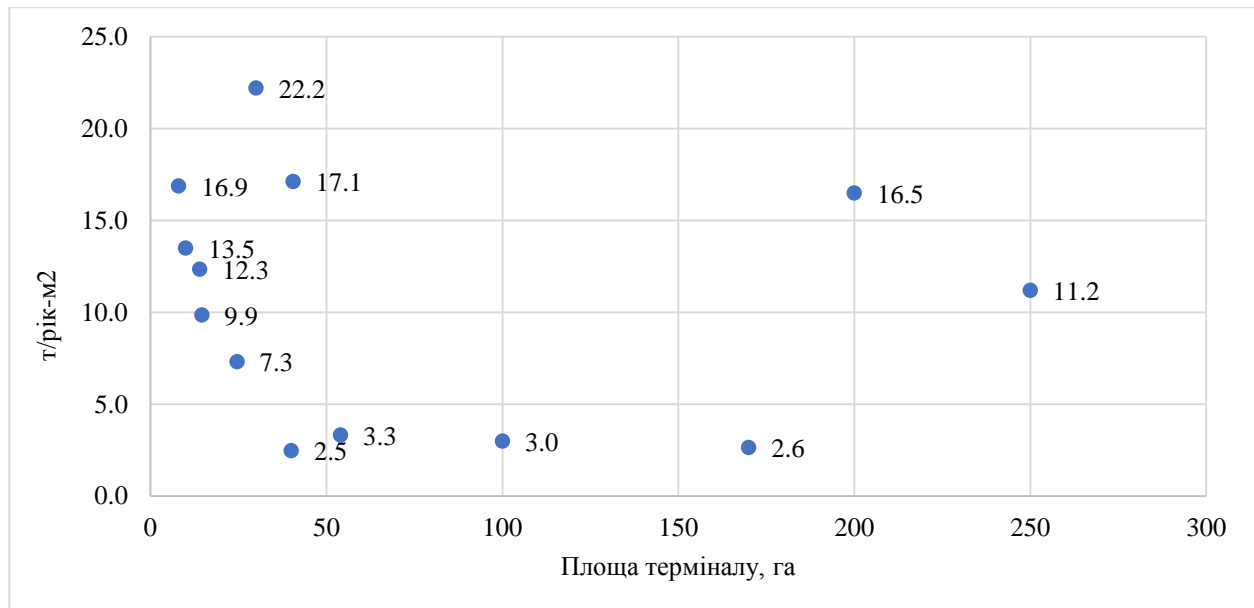


Рис. 2. Питома річна продуктивність терміналів, т/рік-м<sup>2</sup>

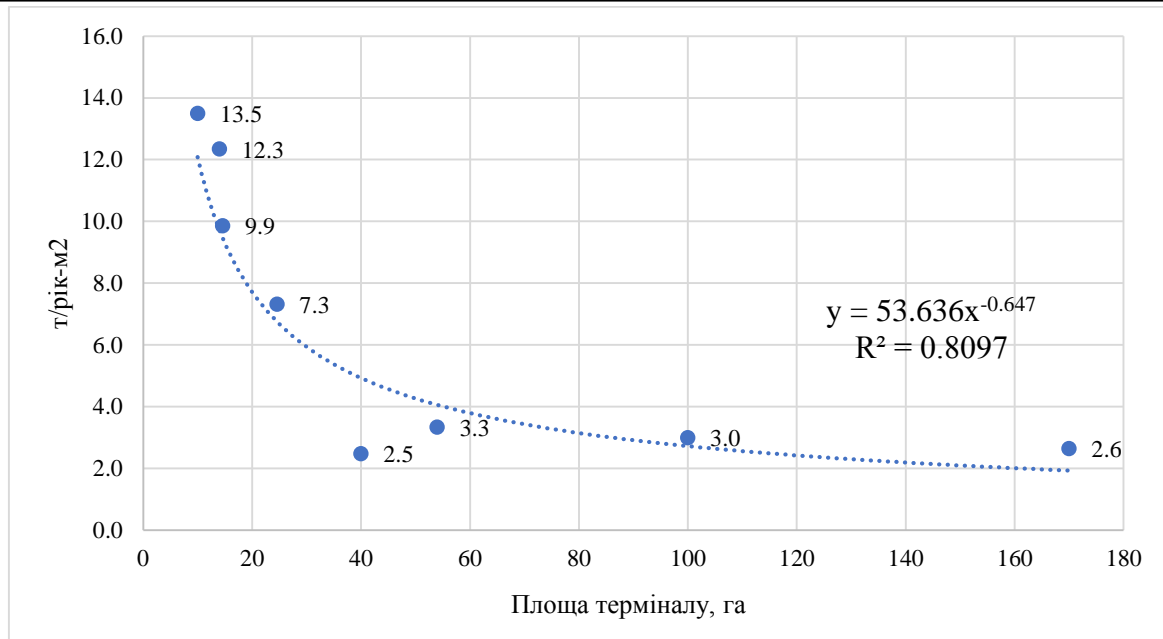
Fig. 2. Specific annual terminal productivity, t/year-m<sup>2</sup>

На рис. 2, у його правій частині, чітко виділяються дві точки, що відповідають терміналам із найбільшою в Європі площею: Nola (Campana), площею 200 га та питомою продуктивністю 16,5 т/рік-м<sup>2</sup>, і Verona, площею 250 га та питомою продуктивністю 11,2 т/рік-м<sup>2</sup>. Ще три термінали мають значно меншу площу (менше ніж 50 га), але досить високу продуктивність (два в Німеччині – DUSS-terminal Hamburg Billwerder, 22,2 т/рік-м<sup>2</sup>, та DUSS-terminal Großbeeren, 16,9 т/рік-м<sup>2</sup>, і один

в Польщі – Metrans HUB terminal Poznań, 17,1 т/рік-м<sup>2</sup>).

Решта європейських терміналів (за площею їх можна віднести до середніх та малих) показують задовільну кореляцію (тіснота зв'язку більше ніж 80 %) між питомою річною продуктивністю та площею терміналу (рис. 3).

На нашу думку, виявлені закономірності формування вантажопотоків будуть релевантними і в умовах України.

Рис. 3. Питома річна продуктивність середніх та малих терміналів, т/рік-м<sup>2</sup>Fig. 3. Specific annual productivity of medium and small terminals, t/year/m<sup>2</sup>

### Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, з урахуванням показаної на рис. 3 кореляційної залежності

$$y = 53,636x^{-0,647},$$

питома річна продуктивність інтермодального терміналу (ІМТ), т/рік-м<sup>2</sup>, може бути визначена за емпіричною формулою:

$$P_{\text{ІМТ}} = \frac{53,63}{S_{\text{ІМТ}}^{0,647}} \approx \frac{64,7}{\sqrt[3]{(S_{\text{ІМТ}})^2}}, \quad (2)$$

де  $S_{\text{ІМТ}}$  – площа ІМТ в га.

Цю продуктивність потрібно розуміти як максимальний річний вантажопотік (тис. т/рік). Який генерує термінал площею  $S_{\text{ІМТ}}$  (га), його можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{ІМТ}} = 647\sqrt[3]{S_{\text{ІМТ}}}. \quad (3)$$

Контрольною точкою для оцінки адекватності моделі, відображеної формулою (3), є значення «У середньому по ЄС» із табл. 2.

Більш ретельний аналіз даних табл. 1 і 2 та

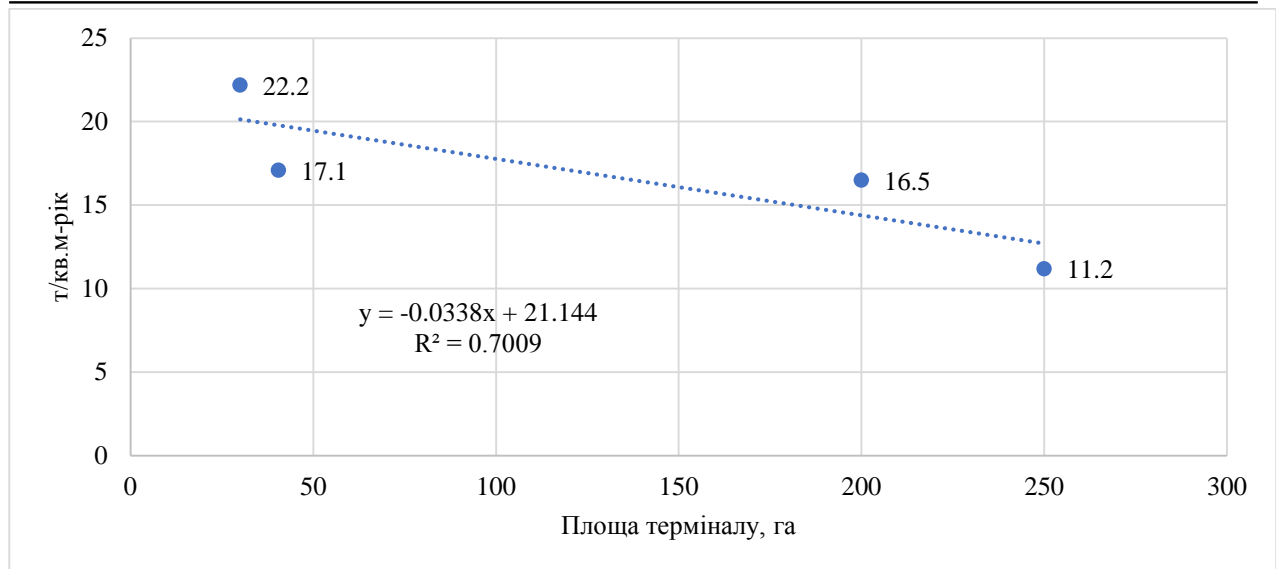
рис. 1 показує, що доцільно провести кластеризацію терміналів. Зокрема, у верхній частині рис. 2 виділяються чотири точки, що відповідають терміналам DUSS-terminal Hamburg Billwerder (22,2 т/рік-м<sup>2</sup>), Metrans HUB terminal Poznań (17,1 т/рік-м<sup>2</sup>), Nola-Campagna (16,5 т/рік-м<sup>2</sup>) та Verona (11,2 т/рік-м<sup>2</sup>). Натомість термінал Kuovola rail-road terminal є зовсім нетиповим, адже має велику площу (170 га), але дуже малу продуктивність (усього 2,6 т/рік-м<sup>2</sup>), що може бути прояснено як недоліками його технології, так і ненадійністю наявних даних.

Це дає підставу виділити два кластери терміналів – великих за площею та продуктивністю, до яких віднесемо зазначені вище чотири термінали: DUSS-terminal Hamburg Billwerder, Metrans HUB terminal Poznań, Nola-Campagna та Verona, і середніх за площею та продуктивністю, до яких віднесені решта терміналів, вказаних у табл. 1, крім нетипового залізнично-автомобільного терміналу Kuovola rail-road terminal.

Продуктивність, або переробну спроможність терміналу, можна розглядати як максимально можливий вантажопотік, що може бути ним генерований.

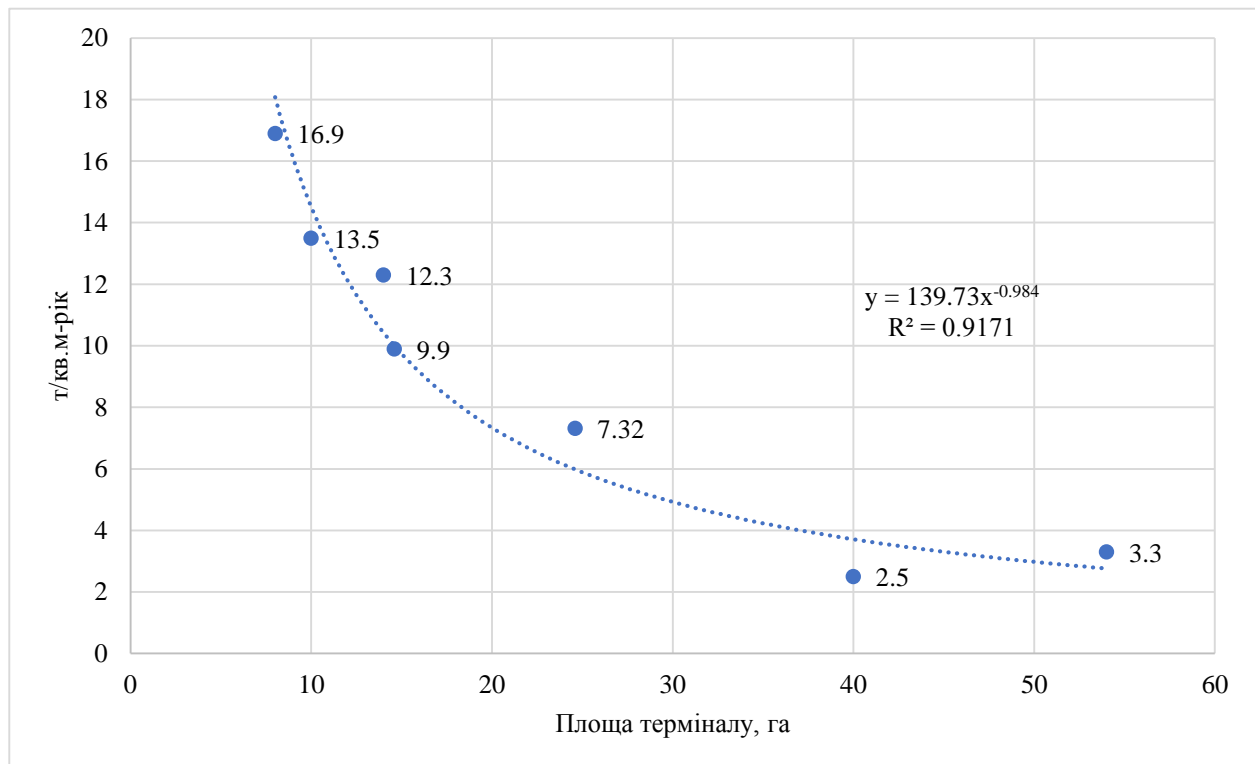
Для виділених кластерів терміналів отримано кореляційні залежності, наведені на рис. 4 та 5.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Рис. 4. Кластер великих терміналів – генерований питомий вантажопотік, т/рік-м<sup>2</sup>Fig. 4. The cluster of large terminals – generated specific cargo flow, t/year-m<sup>2</sup>

Зазначимо, що на рис. 1 показана лінійна кореляційна залежність, яка має найкращий

коефіцієнт апроксимації  $R^2 = 0,7009$  з усіх інших моделей (логарифмічна, степенева або поліноміальна).

Рис. 5. Кластер середніх та малих терміналів – генерований питомий вантажопотік, т/рік-м<sup>2</sup>Fig. 5. Cluster of medium and small terminals – generated specific cargo flow, t/year-m<sup>2</sup>

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Наведені на рис. 4 та 5 залежності  $y = -0,0338x + 21,144$ ;  $y = 139,73x^{-0,984}$  відповідно можна представити більш зручними для використання в нашому дослідженні наближеними емпіричними залежностями, у яких  $y$  – це генерований питомий вантажопотік  $g_t$ , т/рік-м<sup>2</sup>, а  $x$  – це площа ІМТ  $S_{\text{ІМТ}}$ , у гектарах:

– для малих та середніх ІМТ (площею від 1 до 50 га):

$$g_t = \frac{140}{S_{\text{ІМТ}}}; \quad (4)$$

– для великих ІМТ (площею від 51 до 500 га):

$$g_t = 20 - \frac{S_{\text{ІМТ}}}{30}. \quad (5)$$

Ці залежності можна використовувати для прогнозування (у першому наближенні) генерованого вантажопотоку ІМТ залежно від того, яка площа території  $S_{\text{ІМТ}}$ , що може бути використана для його спорудження.

Зрозуміло, що ці прогнози потрібно уточнювати та доповнювати іншими оцінками – маркетинговими дослідженнями, планами розвитку економіки і територій тощо.

**Висновки**

Отримані результати дослідження ґрунтуються на офіційних статистичних даних та іншій інформації щодо функціонування європейських транспортно-логістичних центрів (вантажних терміналів) і можуть бути використані:

– для техніко-економічних обґрунтувань інвестиційних проєктів створення нових та розвитку наявних транспортно-логістичних центрів, інтер- / мультимодальних вантажних терміналів;

– для побудови економіко-математичних моделей розвитку транспортної інфраструктури і території;

– у навчальному процесі для підготовки фахівців різних кваліфікаційних рівнів у галузях транспортної інфраструктури, транспортних технологій, логістики міжнародних мультимодальних вантажних перевезень.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. В Єврокомісії пропонують будувати залізницю з колією 1435 мм з Кракова до Львова. *ЦТС*. URL: [https://cfts.org.ua/news/2023/07/12/v\\_evrokomisi\\_proponuyut\\_buduvati\\_zaliznitsyu\\_z\\_kolieu\\_1435\\_mm\\_z\\_krakova\\_do\\_lvova\\_75699](https://cfts.org.ua/news/2023/07/12/v_evrokomisi_proponuyut_buduvati_zaliznitsyu_z_kolieu_1435_mm_z_krakova_do_lvova_75699)
2. Гужевська Л. А., Денис О. В. Сучасні проблеми організації мультимодальних перевезень. *Science Review*. 2021. Vol. 1. Iss. 36. P. 1–5. DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_sr/30012021/7375](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30012021/7375)
3. Долгая С. Логістичний термінал у Вероні стане одним із провідних інтермодальних центрів Європи. *LardiToday*. 2019. URL: <http://surl.li/rdsdp>
4. Ломотько Д., Бакуліч О., Дембіцький В., Бауліна Г., Новальська Н., Шапатіна О. *Науково-технічні дослідження у галузі транспорту*: монографія. 2020. 216 с. DOI: <https://doi.org/10.63048/978-617-7926-26-8.0>
5. Маслій Н. Д., Ніценко В. С., Ганжуренко І. В., Лаврущенко Ю. О., Котенко С. В., Ввардіашвілі А. В., Розвадовська О. В. *Мультимодальні та інтермодальні перевезення: теорія та практика державного регулювання*: монографія. Одеса, 2020. 284 с. DOI: <https://doi.org/10.31520/978-966-02-9483-7>
6. *Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року* [Чинний від 27.12.2024]. Верховна Рада України, 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>
7. Транс'європейська транспортна мережа: ЄС покращить сполучення з Україною та Молдовою. *EU Neighbourseast*. URL: <https://euneighbourseast.eu/uk/news/latest-news/transyevropejska-transportna-merezha-yes-pokrashhyt-spoluchennya-z-ukrayinoyu-ta-moldovoyu/>
8. *Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (із змінами і доповненнями)*. Верховна Рада України, 2023. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text)
9. Шульдінер Ю. В., Примаченко Г. О., Петрик С. В., Пащенко Г. С. Розвиток мультимодальних перевезень за сучасних умов. *Розвиток транспорту*. 2024. № 3 (22). С. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.08>
10. *Best Practices of Intermodal Nodal Points*. 2018. URL: <http://surl.li/pysqb>

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

11. *EUROPLATFORMS. European Association of Transport & Logistics Centres Corporate Presentation Final*. 2015. URL : <http://surl.li/rmtcl>
12. *Fact-finding studies in support of the development of an EU strategy for freight transport logistics. Lot 1: Analysis of the EU logistics sector*. 2015. URL : <http://surl.li/rmsny>
13. Goods services. *Interporto Campano*. URL : <http://surl.li/rsdms>
14. Interporto Bologna. *Terminal Italia*. URL : <http://surl.li/rsegl>
15. Monios J., Bergqvist R. *Intermodal Freight Terminals: A Life Cycle Governance Framework*. Routledge, 2017. 234 p.
16. Monios J., Bergqvist R. *Intermodal Freight Transport and Logistics*. CRC Press, 2017. 280 p.

V. K. MYRONENKO<sup>1\*</sup>, Y. O. ZIUBRYK<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Railway Commercial Activity Management, Kyiv Institute of Railway Transport State University of Infrastructure and Technologies, Ogiyenka St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 111 85 26, e-mail [pupil7591@gmail.com](mailto:pupil7591@gmail.com), ORCID 0000-0002-6088-3867

<sup>2\*</sup>Dep. of Railway Commercial Activity Management, Kyiv Institute of Railway Transport State University of Infrastructure and Technologies, Ogiyenka St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +48 (790) 645 416, e-mail [yarek049@gmail.com](mailto:yarek049@gmail.com), ORCID 0009-0003-4078-0611

## Estimation of the Forecasted Cargo Flow of an Inter-/multimodal Transport and Logistics Center

**Purpose.** The study is aimed at obtaining new knowledge about the patterns of formation of cargo flows generated (induced) during the creation of transport and logistics centers serving multi / intermodal cargo transportation, using products and services of scientometric databases. The timeframe of the studied sources is 2010–2024. **Methodology.** To obtain relevant empirical data, the authors reviewed the literature and official websites of transport and logistics centers (TLCs) in the EU countries, which reflect data on their infrastructure and workloads in servicing various modes of transport. **Findings.** In the course of the work it was found that: 1) the studied set of TLCs of the EU countries can be clustered by the ratio «TLC area, ha – generated annual cargo flow per unit area of TLC,  $t/(m^2\text{-yr})$ »; 2) clusters of large, small and medium-sized (by area) TLCs can be conditionally distinguished; 3) as a rule, small TLCs generate more cargo per unit area, which sets the goal for further research – to determine the optimal area and other parameters of TLCs according to the criterion of its maximum specific productivity per unit area. **Scientific originality.** For the first time, the authors obtained quantitative dependencies of the ratio of «TLC area, ha – generated annual cargo flow per unit area of TLC,  $t/(m^2\text{-yr})$ », which have the character of a decreasing power function for small and medium-sized TLCs and a decreasing linear function for large (by area) TLCs. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to predict the size of the generated cargo flow depending on the selected design solutions when creating new TLCs, which will increase the reliability of feasibility studies for relevant investment projects. These studies can also be useful in the educational process in the areas of «Railway Transport», «Transport Technologies», «Construction and Design of Transport Infrastructure», in the study of the disciplines «Multimodal Freight Transportation», «Logistics of International Freight Transportation», organization of scientific and practical seminars, advanced training courses, etc.

**Keywords:** multimodal transportation; intermodal transportation; transport and logistics center; generated cargo flow; induced cargo flow

### REFERENCES

1. European Commission Proposes Building 1435-Mm-Gauge Railway From Kraków To Lviv. *CTS*. Retrieved from [https://cfts.org.ua/news/2023/07/12/v\\_evrokomisi\\_proponuyut\\_buduvati\\_zalznitsyu\\_z\\_kolieyu\\_1435\\_mm\\_z\\_krakova\\_do\\_lvova\\_75699](https://cfts.org.ua/news/2023/07/12/v_evrokomisi_proponuyut_buduvati_zalznitsyu_z_kolieyu_1435_mm_z_krakova_do_lvova_75699) (in Ukrainian)
2. Guzhevska, L., & Denys, O. (2021). Modern Problems of Organization of Multimodal Transportation. *Science Review*, 1(36), 1-5. DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_sr/30012021/7375](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30012021/7375) (in Ukrainian)
3. Dolhaia, S. Lohistychnyi terminal u Veroni stanut odnym iz providnykh intermodalnykh tsentriv Yevropy. *LardiToday*. Retrieved from <http://surl.li/rsdsp> (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Lomotko, D., Bakulich, O., Dembitskyi, V., Baulina, H., Novalska, N., & Shapatina, O. (2022). *Scientific and technical research in the field of transport* (Vol. 1). DOI: <https://doi.org/10.63048/978-617-7926-26-8.0> (in Ukrainian)
5. Maslii, N. D., Nitsenko, V. S., Hanzhurenko, I. V., Lavrushchenko, Yu. O., Kotenko, S. V., Vardiashvili, A. V., & Rozvadovska, O. V. (2020). *Multimodal and intermodal transportation: theory and practice of state regulation*. DOI: <https://doi.org/10.31520/978-966-02-9483-7> (in Ukrainian)
6. *Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku*. Verkhovna Rada Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> (in Ukrainian)
7. Deal on new EU guidelines for TEN-T projects cuts ties with Russia and improves links with Ukraine and Moldova. *EU Neighbourseast*. Retrieved from <https://euneighbourseast.eu/uk/news/latest-news/transyevropejska-transportna-merezha-yes-pokrashhyt-spoluchennya-z-ukrayinoyu-ta-moldovoyu/> (in Ukrainian)
8. *Uhoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony (iz zminamy i dopovnenniamy)*. Verkhovna Rada Ukrainy. Retrieved from [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text) (in Ukrainian)
9. Shuldiner, J. V., Prymachenko, H. O., Petryk, S. V., & Pashchenko, G. S. (2024). Development multimodal transportation in modern conditions. *Transport Development*, 3(22), 123-135. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.08> (in Ukrainian)
10. *Best Practices of Intermodal Nodal Points*. (2018). Retrieved from <http://surl.li/pysqb> (in English)
11. *EUROPLATFORMS. European Association of Transport & Logistics Centres Corporate Presentation Final*. (2015). Retrieved from <http://surl.li/rmtcl> (in English)
12. *Fact-finding studies in support of the development of an EU strategy for freight transport logistics. Lot 1: Analysis of the EU logistics sector*. (2015). Retrieved from <http://surl.li/rmsny> (in English)
13. Goods services. *Interporto Campano*. Retrieved from <http://surl.li/rsdms> (in English)
14. *Interporto Bologna. Terminal Italia*. Retrieved from <http://surl.li/rsegl> (in Italy)
15. Monios, J., & Bergqvist, R. (2017). *Intermodal Freight Terminals: A Life Cycle Governance Framework*. Routledge. (in English)
16. Monios, J., & Bergqvist, R. (2017). *Intermodal Freight Transport and Logistics*. CRC Press. (in English)

Надійшла до редколегії: 02.12.2024

Прийнята до друку: 27.03.2025

## УДК 629.3:[621.355:504.5-027.33]

В. Є. ОЛІШЕВСЬКА<sup>1\*</sup>, Г. П. ІВАНОВА<sup>2\*</sup>, Г. С. ОЛІШЕВСЬКИЙ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. автомобілів та автомобільного господарства, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 36 68 845, ел. пошта olishevskav.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

<sup>2\*</sup>Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

<sup>3\*</sup>Каф. електроенергетики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 56 51 830, ел. пошта olishevskiy.h.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

## Переробка свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів: виклики та перспективи

**Мета.** Автомобільний транспорт виконує важливу роль у функціонуванні та розвитку економіки країни, але його експлуатація супроводжується негативним впливом на навколишнє середовище, споживанням дефіцитних ресурсів та зростанням кількості відходів, серед яких найбільш небезпечними є відпрацьовані свинцево-кислотні акумулятори. Основною метою роботи є дослідження сучасного стану переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів в умовах економічної кризи, дефіциту енергоресурсів та інтенсивного забруднення навколишнього середовища, а також визначення її перспектив в Україні. **Методика.** Сьогодні відбувається швидке зростання рівня автомобілізації нашої країни, що викликає суттєве збільшення кількості свинцево-кислотних акумуляторів, які потребують переробки. Відсутність сучасної ефективної інфраструктури для збору відпрацьованих акумуляторів автомобілів часто призводить до їх потрапляння на звалища. Ця негативна тенденція спричиняє втрату ресурсоцінних вторинних матеріалів та забруднення навколишнього середовища. Сучасні технології переробки свинцево-кислотних акумуляторів характеризуються недостатньою ефективністю та потребують значних фінансових витрат. Важливим викликом є негативний вплив технології переробки акумуляторів на навколишнє середовище. Перспективними напрямками, що дозволять переробляти свинцево-кислотні акумулятори, є створення сучасної інфраструктури для збору та переробки акумуляторів та розвиток технологій рециклінгу, зокрема використання свинцю з акумуляторів у виробництві радіаційностійкого бетону. Комплексне дослідження проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів дозволить задовольнити потребу в економії ресурсів та збільшенні раціонального використання ресурсів, що містяться у відпрацьованих свинцево-кислотних акумуляторах. **Результати.** Проаналізовано сучасний стан та проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів. Показано, що переробка акумуляторного брухту дозволяє вирішувати дві актуальні проблеми: охорони навколишнього середовища від забруднення та отримання цінної вторинної сировини. Досліджено можливості застосування для переробки акумуляторного брухту вібраційної шокової дробарки з нахильною камерою дроблення. **Наукова новизна.** Проведено комплексний аналіз проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів, що дозволив виявити специфічні особливості, тенденції розвитку та виклики. Обґрунтовано можливість застосування для переробки акумуляторного брухту вібраційної шокової дробарки з нахильною камерою дроблення. **Практична значимість.** Розглянуто основні напрями та проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів, використання продуктів переробки, у тому числі в будівельній галузі. Запропоновано використовувати для переробки свинцево-кислотних акумуляторів вібраційну шокову дробарку з нахильною камерою дроблення.

**Ключові слова:** свинцево-кислотний акумулятор; екологічний вплив; вібраційна шокова дробарка; дроблення акумуляторної пластини; відбудова транспортної інфраструктури; будівельні об'єкти; радіаційнозахисні споруди; важкий бетон

### Вступ

Автомобільний транспорт України, який належить до критичної інфраструктури, виконує важливі економічні та соціальні завдання [2, 15].

А після підписання Угоди про асоціацію між

Україною та ЄС перед автомобільним транспортом постали завдання, пов'язані з лібералізацією, інституціональними змінами та модернізацією. Серед цілей модернізації авто-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

мобільного транспорту України прописані екологічно безпечний розвиток та оптимальне ресурсне забезпечення [10].

Але функціонування автомобільного транспорту України сьогодні має свої особливості:

- швидке зростання рівня автомобілізації; так, автомобільний транспорт України ще у 2017 році налічував понад 9,2 млн транспортних засобів, у тому числі 6,9 млн легкових автомобілів, близько 250 тис. автобусів, майже 1,3 млн вантажних автомобілів, понад 840 тис. одиниць мототранспорту [10, 12];

- технічна та (або) моральна застарілість майже 70 % рухомого складу;

- до 60 % екологічних збитків (за даними уряду України) в Україні пов'язані з перевезенням пасажирів легковими автомобілями;

- середній вік парку легкових автомобілів в Україні сягає 22,7 років (за міжнародними нормами, допустимий термін експлуатації легкових автомобілів складає 10 років [1]);

- кількість автомобілів віком понад 10 років в Україні складає 83 %;

- велике споживання дефіцитних ресурсів;
- значний негативний вплив на навколишнє середовище (викиди в атмосферу шкідливих речовин від автомобільного транспорту становлять 95 % від усіх викидів) [4, 8, 11, 13].

Окремою проблемою функціонування автомобільного транспорту є зростання кількості відходів, що утворюються в процесі його експлуатації та значно забруднюють навколишнє середовище [7, 9, 16].

Одним із найбільш небезпечних для навколишнього середовища видів відходів автомобільного транспорту є відпрацьовані свинцево-кислотні акумулятори, які містять свинець (що належить до найтоксичніших важких металів), сірчану кислоту, ртуть, кадмій, діоксид марганцю, літій та ряд інших шкідливих речовин [7, 9, 16].

Актуальність проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів, які є джерелом цінних вторинних матеріальних ресурсів, зростає на тлі воєнного стану України. Об'єкти транспортної інфраструктури стали другим після житлових будівель сектором, який зазнав найбільших руйнувань, пошкоджень або порушень функціонування [6, 15]. Станом на початок вересня 2023 р. загальна сума збитків на транспорті склала

36,6 млрд дол. США [15]. Такий стан транспортної інфраструктури потребує економії ресурсів та вдосконалення ресурсоощадних технологій.

### Мета

Основною метою роботи є дослідження сучасного стану переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів в умовах економічної кризи, дефіциту енергоресурсів та інтенсивного забруднення навколишнього середовища, а також визначення її перспектив в Україні.

### Методика

До основних проблем, які сьогодні виникають під час переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів, належать такі:

- швидке зростання рівня автомобілізації нашої країни, що призводить до суттєвого збільшення кількості свинцево-кислотних акумуляторів, які потребують переробки;

- плани зі збільшення частки електромобілів до 15 % від усієї кількості автомобілів до 2030 р. (для реалізації внеску України в рамках Паризької конвенції), що не тільки не зменшує проблему переробки відпрацьованих акумуляторів, а навпаки, збільшує її, тому що виникає потреба переробки літій-іонних, нікель-кадмієвих, нікель-метал-гідридних та інших акумуляторів;

- відсутність ефективної інфраструктури для збору відпрацьованих акумуляторів автомобілів;

- потрапляння акумуляторів на звалища, що призводить до втрати ресурсоцінних вторинних матеріалів та забруднення навколишнього середовища;

- низька ефективність сучасних технологій переробки акумуляторів;

- потреба у значних фінансових витратах для переробки акумуляторів;

- негативний вплив технології переробки акумуляторів на навколишнє середовище;

- потреба у створенні сучасної інфраструктури для збору та переробки акумуляторів;

- необхідність розвитку технології рециклінгу;

- підготовка до повоєнної відбудови, потреба в економії ресурсів і збільшенні раціонального використання ресурсів, які містяться у відпрацьованих свинцево-кислотних акумуляторах.

Вирішення цих проблем наразі є актуальним.

### Результати

Відпрацьовані свинцево-кислотні акумулятори автомобілів як джерело забруднення навколишнього середовища. Токсичні хімічні речовини свинець та сурма, які містяться у відпрацьованих свинцево-кислотних акумуляторах, що потрапили на звалища, з часом забруднюють атмосферу, воду та ґрунт. Наступним етапом забруднення є потрапляння свинцю та сурми через ґрунт у рослини, і далі – у продукти харчування. Із забрудненими продуктами харчування в організм людини потрапляє до 85 % від загального надходження свинцю [9].

Окремим питанням є відсутність ефективної інфраструктури в Україні для збору та переробки акумуляторів автомобілів, що додатково створює серйозні ризики для довкілля [7].

Тому гостро постає питання збору та переробки свинцево-кислотних акумуляторів [9, 17, 19].

Відпрацьовані свинцево-кислотні акумулятори автомобілів як джерело вторинних ресур-

соцінних матеріалів. Найбільш поширеними хімічними джерелами струму на автомобільному транспорті є свинцево-кислотні акумулятори, які поділяють на три групи: обслу́жні, малообслу́жні та необслу́жні (кальцієві) [9, 14].

Традиційний свинцево-кислотний акумулятор містить електроди, виконані у вигляді свинцевих ґратчастих пластин. Осередки пластин заповнені масою, що складається зі свинцю, води та сірчаної кислоти. Свинцево-кислотні акумулятори, залежно від марки, містять 42...67 % свинцю, 22...35 % органічної маси, 0,1...6,0 % електроліту, 3...10 % вологи, 8...14 % кисню, а також сліди сірки та інших сполук [9].

У необслу́жних акумуляторах застосовують ґрати зі свинцево-кальцієво-олов'янистих сплавів і сурм'янистих сплавів зі зменшеним вмістом сурми [9].

Для виробництва акумуляторів використовують, як правило, сплави PbSb3,5, PbSb1,8Se та PbSb4,5, хімічний склад яких наведено в табл. 1 [9].

Таблиця 1

Склад сплавів, які використовуються у виробництві акумуляторних батарей

Table 1

Composition of alloys used in the production of rechargeable batteries

Назва хімічного елемента	PbSb3,5	PbSb1,8Se	PbSb4,5
Кадмій	≤0,001	≤0,001	≤0,001
Сурма	3,3...3,8	1,2...1,8	4,5...4,8
Миш'як	0,003	0,07...0,11	0,03...0,05
Олово	0,005...0,01	0,40...0,55	0,40...0,60
Срібло	Необмежено	Необмежено	Необмежено
Вісмут	≤0,03	≤0,03	≤0,03
Мідь	0,01...0,06	≤0,04	≤0,08
Залізо	≤0,001	≤0,001	≤0,001
Нікель	≤0,002	≤0,002	≤0,002
Сірка	0,003...0,01	0,003...0,01	0,003...0,01
Цинк	≤0,001	≤0,001	≤0,001
Селен		≤0,002	

Важливість свинцю як матеріалу для виробництва свинцево-кислотних акумуляторів підкреслює той факт, що вже у 2014 році 90 % очи-

щеного свинцю використовували для виробництва акумуляторних батарей [17].

Збільшення кількості автомобілів призводить до зростання виробництва акумуляторів,

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

що, у свою чергу, викликає зростання споживання свинцю.

Дефіцит свинцю, який традиційно пов'язують зі зростанням виробництва свинцево-кислотних акумуляторів, також обумовлений вичерпанням запасів рудної сировини та її значним збідненням, потребою будівництва сучасних гірничо-металургійних комплексів. Привертає увагу той факт, що видобуток сировини також має негативний вплив на навколишнє середовище та супроводжується забрудненням водних ресурсів, деградацією земель та порушенням екологічних систем [7].

У відпрацьованих автомобільних акумуляторах свинець наявний у різних видах:

- у металевій формі (свинцево-сурм'янистий сплав) – 34,5 %;
- у вигляді сульфатів свинцю – 23,5 %;
- у вигляді оксидів свинцю – 17,2 % [9].

Досвід промислово розвинених країн світу показує, що приріст виробництва свинцю з рудної сировини складає 8 %, а із вторинної сировини, головним джерелом якої є відпрацьовані акумулятори, – 15 % [9].

У роботі [17] зазначено, як змінювався рівень переробки акумуляторів у США: він становив близько 70 % у 1980 році, збільшився до 93 % у 2000...2003 роках, до 96 % у 2005 році та залишається на рівні 99 % з 2010 року.

Наведені приклади досвіду переробки свинцево-кислотних акумуляторів в інших країнах показують, що можлива майже 100 % переробка акумуляторів автомобілів. Цей досвід доцільно використовувати в нашій країні. Важливим аспектом, який дозволить використовувати відпрацьовані свинцево-кислотні акумулятори автомобілів як джерела вторинних ресурсоцінних матеріалів, є створення відповідної інфраструктури для збору та переробки акумуляторів.

*Аналіз технологій переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів.* Для переробки акумуляторів використовують різні методи, у тому числі пірометалургійні та електрохімічні [9, 17, 19, 20].

Пірометалургійні способи переробки акумуляторного брухту можна класифікувати на три групи:

- металургійна переробка після часткової підготовки;
- комбінований спосіб підготовки та металургійної обробки;
- комплексна переробка цілих акумуляторів.

Недоліками пірометалургійних методів є складність процесів переробки, висока вартість, складність очищення газів, що утворюються.

Електрохімічні технології переробки акумуляторного брухту засновані на хімічному або електрохімічному розчиненні свинцевмісних компонентів акумуляторів (пластин, шламу) і вилученні свинцю з електроліту методом електрофінування або електроекстракції.

Електрохімічні технології, порівняно з пірометалургійними методами, дозволяють:

- отримувати чистий свинець, бо метали-домішки не осідають на катоді, а випадають у вигляді шламу або переходять у розчин електроліту;
- забезпечувати більш високий вихід продукту переробки.

Електрохімічні технології переробки акумуляторів мають ряд недоліків:

- низьку швидкість процесу переробки;
- необхідність проведення попередніх операцій із переведення свинцю в розчинну форму, оскільки акумуляторні пластини містять свинець не тільки в металевій формі, але й у вигляді сульфату та діоксиду, практично нерозчинних у більшості електролітів.

Суттєвою проблемою, яка виникає під час переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів, є негативний вплив на навколишнє середовище. Процес переробки супроводжується забрудненням повітря, ґрунту, води та сільськогосподарських культур і, зрештою, негативно впливає на здоров'я людей [18].

*Дослідження можливості використання вібраційної цюкової дробарки для переробки свинцево-кислотних акумуляторів.* Сьогодні існує велика кількість технологічних схем переробки свинцево-кислотних акумуляторів, одна з яких показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема переробки свинцево-кислотних акумуляторів:  
червоним трикутником позначено операцію подрібнення акумуляторних пластин

Fig. 1. Scheme of recycling lead-acid batteries:  
the red triangle indicates the operation of shredding battery plates

У більшості технологій перед хімічною та металургійною переробкою застосовують обробку та сепарацію брухту.

Для механізованої обробки свинцево-кислотних батарей використовують різне обладнання: гідравлічні преси, автомати різання батарей з дисковими пилами, молоткові дробарки [9].

Наявні технологічні лінії з подрібнення акумуляторів базуються, як правило, на застосуванні різного роду молоткових дробарок, у яких подрібнений продукт є сумішшю компонентів вихідної сировини. Це потребує значної кількості додаткового устаткування для розділення отриманих продуктів.

Підвищити ефективність процесу дроблення та якість продуктів можна шляхом використання вібраційної шоквої дробарки з нахильною камерою дроблення. Тому було проведено експериментальні дослідження можливості переробки свинцево-кислотних акумуляторів на лабораторному зразку вібраційної шоквої дробарки з нахильною камерою дроблення ВЩДН–120.

Конструктивна схема дробарки, у загальному вигляді являє собою коливальну систему, у якій щокам, що рухомо зчленовані з корпусом

за допомогою пружних елементів, надаються коливання з частотою порядку 16...32 Гц. Нижня щока 1 (рис. 2) має стійки 2, у яких за допомогою осі підвісу 3 встановлена рухома щока 4 з віброзбудником 5. Дробарка розташована на опорних амортизаторах 6, а нижня щока 1 і рухома щока 4 пов'язані між собою пружним елементом 7.

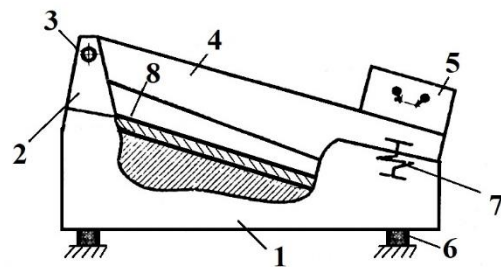


Рис. 2. Конструктивна схема вібраційної шоквої дробарки:

1 – нижня щока; 2 – стійки; 3 – вісь підвісу; 4 – рухома щока; 5 – віброзбудник; 6 – опорні амортизатори; 7 – пружний елемент; 8 – робоча поверхня нижньої щоки

Fig. 2. Schematic diagram of a vibrating jaw crusher:  
1 – lower cheek; 2 – racks; 3 – suspension axis;  
4 – movable cheek; 5 – vibration exciter;  
6 – support shock absorbers; 7 – elastic element;  
8 – working surface of the lower cheek

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Акумуляторний брухт, що надходить до камери дроблення, переміщується по робочій поверхні нижньої щоби 8 і піддається високочастотному ударному навантаженню з боку рухомої щоби 4, що здійснює коливальні рухи під дією вібробудника 5.

На рис. 3 представлено складові вихідної пластини.

Дроблення пластин проведено за таких параметрів: частота коливання щік 20 Гц, амплітуда коливання рухомої щоби 5 мм, кут захоплення 12°, ширина розвантажувальної щілини 3 мм, довжина паралельної зони 100 мм.



Рис. 3. Акумуляторна пластина:  
1 – свинцеві ґрати; 2 – сульфатно-оксидна складова

Figure 3. Battery plate:  
1 – lead lattice; 2 – sulfate-oxide component

Взаємодія акумуляторного брухту з рухомою щобою призвела до поділу пластини на свинцеві ґрати (рис. 4, а) та активну масу (рис. 4, б).

Фракційний склад виділеної активної маси містить 62 % матеріалу крупністю – 0,5 мм, 20 % – крупністю 0,5...1,0 мм, 8 % – крупністю 1,0...2,0 мм та 10 % – крупністю понад 2,0 мм.

Використання продуктів переробки свинцево-кислотних акумуляторів. Токсичність свинцю обмежує коло його застосування, однак у складі сплавів або під час спорудження спеціальних конструкцій цей метал доречно використовувати.

Перед Україною, окрім скорочення техногенних відходів, стоїть проблема розробки ефективних радіаційнозахисних матеріалів із використанням продуктів рециклінгу.

У наш час актуальним питанням є заходи безпеки в разі виникнення небезпечної радіаційної ситуації. Будівництво укриттів та захист бу-

дівель від радіоактивного випромінювання є нагальною потребою сьогодення [5].

Свинець найбільш ефективно, порівняно з іншими матеріалами, затримує різні небезпечні випромінювання, тому його застосовують для радіаційного захисту в різних галузях: на ядерних реакторах, у рентгенівських кабінетах, у виробництві контейнерів для перевезення радіоактивних речовин та ін.

а – а



б – б



Рис. 4. Результат дроблення акумуляторної пластини:

а – свинцеві ґрати; б – сульфатно-оксидна фракція

Fig. 4. The result of battery plate crushing:  
а – lead lattice; б – sulfate-oxide fraction

Під час обладнання рентгенівського кабінету саме свинець використовують як захисний шар для стін і дверей, підлоги і стелі, мобільних перегородок, засобів індивідуального захисту – фартухів, наплічників, рукавичок та інших предметів зі свинцевими вставками.

Захист забезпечується завдяки певній товщині екранованого матеріалу, що вимагає точних розрахунків з урахуванням розмірів приміщення, потужності апаратури, інтенсивності використання тощо. Здатність матеріалу знижувати випромінювання вимірюється у «свинцевому еквіваленті» – значенні товщини такого шару чистого свинцю, який здатний розраховане випромінювання поглинути. Ефективним вважають такий захист, який перевершує вказану величину на  $\frac{1}{4}$  мм.

Важкий бетон із вмістом свинцю – один з ефективних матеріалів, які використовують під час будівництва конструктивних елементів стратегічних об'єктів, для зменшення товщини захисних екранів під час зведення атомних електростанцій і підприємств із виробництва ізотопів [3].

#### **Наукова новизна та практична значимість**

У роботі проведено комплексний аналіз проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів, що дозволяє виявити специфічні особливості, тенденції розвитку та виклики.

Переробка свинцево-кислотних акумуляторів допомагає вирішувати екологічні проблеми, що пов'язані з утилізацією відпрацьованих батарей. Відходи батарей містять небезпечні матеріали, які можуть завдати шкоди екологічній системі та становлять небезпеку здоров'ю людини.

Переробка відпрацьованих батарей сприяє збереженню природних ресурсів, тому що батареї є джерелом цінних матеріалів, що, у свою чергу, дозволяє знижувати залежність від видобутку сировини та зменшує виснаження природних ресурсів.

Переробка відпрацьованих акумуляторних батарей має велике значення для досягнення нульових показників викидів вуглецю на автомобільному транспорті.

У роботі обґрунтовано можливості застосування вібраційної шокової дробарки з нахильною камерою дроблення для переробки акумуляторних пластин. Розглянуто використання продуктів переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів, у тому числі в будівельній галузі.

#### **Висновки**

У науковій роботі використано опубліковані дані, а також матеріали власних досліджень.

Основною сферою застосування свинцево-кислотних акумуляторів є автомобільна промисловість.

Інтенсивний розвиток автомобільного транспорту призводить до зростання кількості відходів, що утворюються в процесі його експлуатації. Відпрацьовані свинцево-кислотні акумулятори містять свинець, що належить до найтоксичніших важких металів, сірчану кислоту, ртуть, кадмій, діоксид марганцю, літій та інші шкідливі речовини, які вимагають переробки після закінчення експлуатації акумуляторів.

Проведений аналіз сучасного стану та проблеми переробки свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів показав, що переробка акумуляторного брухту дозволяє вирішувати дві актуальні проблеми: охорони навколишнього середовища від забруднення та отримання цінної вторинної сировини.

За відсутності необхідної інфраструктури та обмеженого охоплення, відпрацьовані акумулятори часто потрапляють на звалища, що призводить до забруднення навколишнього середовища та втрат цінних вторинних ресурсів.

Переробка акумуляторів потребує наявності ефективних технологій та значних фінансових витрат.

Наявні технології переробки автомобільних акумуляторів мають низку недоліків, серед яких можна виділити якість продуктів переробки та високу енергоємність процесів переробки.

Одним із шляхів удосконалення технологій переробки акумуляторів є використання вібраційних шокових дробарок із нахильною камерою дроблення, тому було досліджено можливість її застосування для переробки акумуляторних пластин. Отримані результати показують перспективу використання вібраційних шокових дробарок із нахильною камерою дроблення для переробки акумуляторного брухту.

Потенціал використання акумуляторних відходів як вторинної сировини може стати потужним чинником розвитку економіки нашої країни.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ганошенко О. М., Голік Ю. С. Аналіз проблем утворення та утилізації відходів автотранспортного комплексу. *Екологічні науки*. 2018. № 21. С. 40–45.
2. *Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури*. Постанова від 9 жовтня 2020 р. № 1109. Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
3. *ДСТУ 9208:2022. Бетони важкі. Технічні умови* [Чинний від 2023-09-01]. Київ : ДП «НДІБК», 2022. 21 с.
4. Запорожець О. І., Бойченко С. В., Матвеева О. Л., Шаманський С. Й., Дмитруха, Т. І., Маджд С. М. *Транспортна екологія: навчальний посібник*. Київ : НАУ, 2017. 507 с.
5. Іванова Г. П., Жабчик К. С. Перспективи використання металізованих окатків в якості заповнювача для важких бетонів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2021. № 67. С. 96–103. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.096>
6. Іванова Г. П., Олішевська В. Є., Гапеев С. М., Олішевська С. О. Будівельна галузь України: трансформації та перспективи в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4 (108). С. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/317405>
7. Лахтадир С. Екологічні аспекти виробництва та утилізації акумуляторів. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 13 (41). С. 1110–1119. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1110-1119](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1110-1119)
8. Линник І. Е., Лежнева О. І., Дорожко Є. В., Вакуленко К. Є., Соколова Н. А., Афанасьєва І. А. *Екологічні аспекти автотранспортного комплексу: монографія*. Харків : Видавництво «Смугаста типографія», 2020. 194 с.
9. Нефедов В. Г., Поліщук Ю. В. *Електрохімічна енергетика. Свинцеві акумулятори: улаштування, виробництво, розрахунки*. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2013. 298 с.
10. Никифорок О. І., Чукаєва І. К., Піриашвілі Б. З., Ляшенко О. Ф., Карпов В. М., Кудрицька Н. В. ... Плото І. Ю. *Розвиток інфраструктурних секторів як чинник реалізації пріоритетних напрямів економічної політики України: колективна монографія*. Національна академія наук України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України». Київ, 2017. 522 с.
11. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Екологічний вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище. *Інноваційні технології підготовки кадрів для промисловості та транспорту 2023* : зб. наук. праць міжнар. конф.(Дніпро, 28-29 квіт. 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 147–152.
12. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Обґрунтування раціонального рухомого складу підприємства в умовах переходу до електромобілів. *Автошляховик України*. 2024. № 2. С. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44>
13. Понеділок Ю. В., Кривошапко С. Б. Проблеми та напрямки розвитку автомобільно-транспортної системи. *Інтелектуальні технології управління транспортними процесами* : збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 17-18 лист. 2020 р.). Харків : ХНАДУ, 2020. С. 186–188.
14. *Правила експлуатації акумуляторних свинцевих стартерних батарей колісних транспортних засобів і спеціальних машин, виконаних на колісних шасі* [Чинний від 2008-07-02]. Наказ № 795. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0689-08#Text>
15. Собкевич О. В., Шевченко А. В., Русан В. М., Белашов С. В., Жураковська Л. А., Жаліло Я. А. *Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України: аналітична доповідь*. Київ : НІСД, 2024. 104 с. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03>
16. Яковлева А., Бойченко С., Лейда К., Іванченко О., Фролов В. *Екологістика, рециклінг і утилізація транспорту*. Київ : НАУ, 2019. 266 с.
17. Vača P, Vanýsek P. Issues Concerning Manufacture and Recycling of Lead. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 11. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16114468>
18. Gao X., Zhou Y., Fan M., Jiang M., Zhang M., Cai H., Wang X. Environmental risk assessment near a typical spent lead-acid battery recycling factory in China. *Environmental Research*. 2023. Vol. 233. P. 116417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116417>
19. Kang Z., Huang Z., Peng Q., Shi Z., Xiao H., Yin R., Fu G., Zhao J. Recycling technologies, policies, prospects, and challenges for spent batteries. *IScience*. 2023. Vol. 26. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108072>
20. Radja K., Selami N., Khadra K., Abdelkader F., Laid G. Sustainable practices in lead acid battery recycling. *Brazilian Applied Science Review*. 2025. Vol. 9, No. 1. P 1–13. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv9n1-004>

V. E. OLISHEVSKA<sup>1\*</sup>, H. P. IVANOVA<sup>2\*</sup>, H. S. OLISHEVSKYI<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Automobiles and Automobile Economy, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail olishevska.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

<sup>2\*</sup>Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 45 29 945, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

<sup>3\*</sup>Dep. of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel.+38 (095) 56 51 830, e-mail olishevskiyi.h.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

## Recycling Lead Acid Car Batteries: Challenges and Prospects

**Purpose.** Road transport plays an important role in the functioning and development of the country's economy, but its operation is accompanied by a negative impact on the environment, consumption of scarce resources and an increase in the amount of waste, among which the most dangerous are spent lead-acid batteries. The main purpose of the study is to investigate the current state of recycling of lead-acid car batteries in the context of the economic crisis, energy shortages and intense environmental pollution, as well as to determine its prospects in Ukraine. **Methodology.** Today, there is a rapid increase in the level of motorization in our country, which causes a significant increase in the number of lead-acid batteries that need to be recycled. The lack of modern, efficient infrastructure for collecting used car batteries often leads to their ending up in landfills. This negative trend causes the loss of valuable secondary materials and environmental pollution. Current technologies for recycling lead-acid batteries are characterized by insufficient efficiency and require significant financial costs. An important challenge is the negative impact of battery recycling technology on the environment. Promising areas that will allow the recycling of lead-acid batteries include the creation of a modern infrastructure for battery collection and recycling and the development of recycling technologies, including the use of lead from batteries in the production of radiation-resistant concrete. A comprehensive study of the problem of recycling lead-acid batteries will satisfy the need to save resources and increase the rational use of resources contained in spent lead-acid batteries. **Findings.** The current state and problems of recycling lead-acid batteries for cars are analyzed. It is shown that battery scrap recycling allows solving two urgent problems: environmental protection and obtaining valuable secondary raw materials. The possibilities of using a vibrating jaw crusher with an inclined crushing chamber for the processing of battery scrap were investigated. **Originality.** A comprehensive analysis of the problem of recycling lead-acid car batteries was carried out, which allowed to identify specific features, development trends and challenges. The possibility of using a vibrating jaw crusher with an inclined crushing chamber for the processing of battery scrap is substantiated. **Practical value.** The main directions and problems of recycling lead-acid car batteries, the use of recycling products, including in the construction industry, are considered. It is proposed to use a vibrating jaw crusher with an inclined crushing chamber for the processing of lead-acid batteries.

**Keywords:** lead-acid battery; environmental impact; vibrating jaw crusher; battery plate crushing; reconstruction of transport infrastructure; construction facilities; radiation protection structures; heavy concrete

## REFERENCES

1. Ganoshenko, E., & Holik, Yu. (2021). Analysis of the problem of the formation and disposal of waste motor complex. *Ecological Sciences*, 21, 40-45. (in Ukrainian)
2. *Deiaki pytannia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury*. No 1109. (2020, 9 October). *Verkhovna Rada of Ukraine: Legislation of Ukraine*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text> (in Ukrainian)
3. *Betony vazhki. Tekhnichni umovy, 194 DSTU 9208:2022* (2022). Kyiv: DP «NDIBK». (in Ukrainian)
4. Zaporozhecj O. I., Bojchenko S. V., Matvjejeva O. L., Shamanskyj S. J., Dmytrukha, T. I., Madzhd S. M. *Transportna ekologhija: navchalnyj posibnyk*. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)
5. Ivanova, H., & Zhabchuk, K. (2021). Prospects of using metallized pellets as aggregates for heavy concretes. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 67, 96-103. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.096> (in Ukrainian)
6. Ivanova, H. P., Olishevska, V. Ye., Hapiciev, S. M., & Olishevska, S. O. (2024). Construction Industry in Ukraine: Transformations and Prospects in the Context of Martial Law and Postwar Reconstruction. *Science and Transport Progress*, 4(108), 80-88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/317405> (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Lakhtadyr, S (2024). Environmental aspects of battery production and disposal. *Science and Technology Today*, 13(41), 1110-1119. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1110-1119](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1110-1119) (in Ukrainian)
8. Lynnyk, I. E., Lezhneva, O. I., Dorozhko, Ye. V., Vakulenko, K. Ye., Sokolova, N. A. & Afanas'yeva, I. A. (2020). *Ekolohichni aspekty avtotransportnoho kompleksu: monohrafiia*. Kharkiv: Vydavnytstvo «Smuhasta typohrafiya». (in Ukrainian)
9. Nefedov, V. H., & Polishchuk, Yu. V. (2013). *Elektrokhimichna enerhetyka. Svyntsevi akumulatory: ulash-tuvannia, vyrobnytstvo, rozrakhunky*. Dnipropetrovsk : DVNZ UDKhTU. (in Ukrainian)
10. Nykyforuk, O. I., Chukayeva, I. K., Piriashvili, B. Z., Lyashenko, O. F., Karpov, V. M., Kudryts'ka, N. V. ..., & Plyuta, I. Yu. (2017). *Rozvytok infrastrukturykh sektoriv yak chynnyk realizatsiyi priorytetnykh napryamiv ekonomichnoyi polityky Ukrainy*. NASU, SI "Institute of Economics and Forecasting of the NAS of Ukraine". Kyiv. (in Ukrainian)
11. Olishevskaya, V. E., & Olishevskaya, H. S. (2023, April). Motor transport ecological influencing on an environment. In *Innovative Technologies of Personnel Training for Industry and Transport 2023: Conference Proceedings* (pp. 147-152). Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
12. Olishevskaya, V., & Olishevskiy, H. (2024). Substantiating rational rolling stock at an enterprise in the transition to electric vehicles. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, 2, 35-44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44> (in Ukrainian)
13. Ponedilok, Yu. V., & Kryvoshapko, S. B. (2020, Nov.). Problemy ta napriamky rozvytku avtomobilno-transportnoi systemy. In *Intelektualni tekhnologii upravlinnia transportnyimi protsesami: zbirnyk materialiv mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (pp. 186–188). Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
14. *Pravyla ekspluatuvannya akumulatorykh svyntsevykh starternykh batarey kolis-nykh transportnykh zasobiv i spetsial'nykh mashyn, vykonanykh na kolisnykh shasi*, No 795. (2008). *Verkhovna Rada of Ukraine: Legislation of Ukraine*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0689-08#Text> (in Ukrainian)
15. Sobkevych, O. V., Shevchenko, A. V., Rusan, V. M., Bielashov, Ye. V., Zhurakovska, L. A., & Zhalilo, Ya. A. (2024). *Priorytety rozvytku realnoho sektora v umovakh viiny ta povoiennoho vidnovlennia ekonomiky Ukrainy: analitychna dopovid*. Kyiv : NISD. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03> (in Ukrainian)
16. Yakovleva, A., Boichenko, S., Leida, K., Ivanchenko, O., & Frolov, V. (2019). *Ekolohistyka, retsyklinh i utylizatsiia transportu*. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)
17. Bača, P., & Vanýsek, P. (2023). Issues Concerning Manufacture and Recycling of Lead. *Energies*, 16(11), 4468. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16114468> in English)
18. Gao, X., Zhou, Y., Fan, M., Jiang, M., Zhang, M., Cai, H., & Wang, X. (2023). Environmental risk assessment near a typical spent lead-acid battery recycling factory in China. *Environmental Research*, 233, 116417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116417> (in English)
19. Kang, Z., Huang, Z., Peng, Q., Shi, Z., Xiao, H., Yin, R., Fu, G., & Zhao, J. (2023). Recycling technologies, policies, prospects, and challenges for spent batteries. *IScience*, 26(11), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108072> (in English)
20. Radja, K., Selami, N., Khadra, K., Abdelkader, F., & Laid, G. (2025). Sustainable practices in lead acid battery recycling. *Brazilian Applied Science Review*, 9(1), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv9n1-004> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2024

Прийнята до друку: 20.03.2025

## УДК 624.21.09:624.014.2-047.86

Д. С. СПИВАК<sup>1\*</sup>, С. В. КЛЮЧНИК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7771-8377

## Вплив матеріалів і масштабного фактора на руйнування К-подібних вузлів трубобетонних мостів: ефективність конструктивних параметрів

**Мета.** У роботі передбачено провести аналіз напружено-деформованого стану К-подібних вузлів трубобетонних конструкцій за допомогою програмного моделювання методом скінченних елементів з урахуванням нелінійних характеристик матеріалів, що, у свою чергу, потребує оцінки впливу матеріалів і розмірів вузлів на роботу порожнистих розкосів у решітчастих конструкціях мостів. **Методика.** Передбачено чисельне моделювання напружено-деформованого стану К-подібних вузлів трубобетонних поясів у програмі ANSYS. Для аналізу використано два класи бетону (C16/20 і C50/60) та дві марки сталі (16Д і 10ХСНД), які змодельовано із застосуванням критерію пластичності Друкера–Прагера для бетону та інструменту багатолінійного ізотропного зміцнення для сталі. Було підготовлено 12 варіантів моделей вузлів із різними характеристиками матеріалів та двома масштабами розмірів. Для наближення до реального стану навантаження на вузли здійснено у два етапи: спочатку було завантажено пояс, а потім розкоси до їх повної відмови. **Результати.** Розрахунки показали, що деформування порожнистих зразків вузлів відповідає лабораторним експериментам інших авторів. Вплив бетонного заповнення на стиснуті та розтягнуті розкоси був значним, особливо для стиснутих, де ефект досяг 20,8 %. Бетон класу C50/60 не завжди поліпшує ефективність, іноді поступаючись бетону класу C16/20. Збільшення розміру вузла позитивно впливає на ефективність бетону, зокрема для стиснутих розкосів, де приріст склав до 12,3 %. Підвищення міцності сталі з 16Д до 10ХСНД для розтягнутих розкосів показало ефективність від 0 до 8,6 %, а для стиснутих – до 22,8 %. Графіки напружень уздовж зварного шва показали, що бетон допомагає рівномірно розподіляти напруження як у стиснутих, так і в розтягнутих розкосах. **Наукова новизна.** У роботі проведено аналіз впливу матеріалів та геометрії сталевих вузлів, частково заповнених бетоном, на роботу порожнистих розкосів, де особливу увагу приділено малодослідженому фактору розміру вузла. **Практична значимість.** Завдяки скінченному елементному нелінійному аналізу та застосуванню нормативних актів України і європейських стандартів, встановлено принципи оптимального підбору класів бетону та сталі для трубобетонних К-подібних вузлів. Це дозволяє забезпечити надійність сучасних мостових решітчастих конструкцій, підвищити їхню ефективність та економічність.

*Ключові слова:* трубобетон; решітчасті конструкції; мостові ферми; К-подібні вузли; метод скінченних елементів; нелінійне моделювання; режим руйнування

### Вступ

На сьогодні понад 200 зведених середніх та великих мостів у світі демонструють переваги використання як головних несних елементів сталевих труб, заповнених бетоном. Понад 30 років активного будівництва трубобетон використовують в аркових та фермових мостах для пропуску залізничного чи автомобільного транспорту [11].

Завдяки двовісному обтисненню бетону трубобетонний елемент демонструє значно більшу несну здатність та жорсткість, ніж сумарна міцність його окремих компонентів.

Цей ефект найбільше та найкраще проявляється в елементах круглого перерізу, де домінує сила стиску, що пояснює застосування трубобетону тільки в стиснених поясах прогонів мостів та їхніх опорах [15]. Зазвичай бетон заливають лише в пояси, тоді як розкоси залишають незаповненими, що залежить від вимог та умов будівництва. Наявність бетонного заповнення в поясах решіток не лише значно підвищує опір вузлів з'єднання елементів і втомну міцність, але й змінює режими руйнування та забезпечує рівномірний розподіл деформацій у місці з'єднання порівняно з порожнистими варіантами [16, 18].

Склепіння аркових мостів часто виконують у вигляді решітки, що робить їх подібними до фермових мостів у питаннях міцності та надійності вузлів з'єднання елементів. Дослідження механічної поведінки композитних ферм за різних умов навантаження показали, що з'єднання елементів решітки є найважливішими ділянками в системі конструкції [13]. З'єднання поясів і розкосів зазвичай виконують зварюванням через стикові або кутові шви по периметру торця розкосу. Хоча існує метод лиття вузлів, він є менш надійним, більш трудомістким та підходить зазвичай у зонах спирання на опорну частину [19].

Останні публікації вказують на необхідність дослідження втомної міцності, місцевих деформацій та відмінностей у режимах руйнування зварних швів і хорди. Окремо слід зазначити нестачу експериментальних випробувань реальних вузлів для більш точного аналізу та розробки надійних методів проектування, зокрема застосування та оцінки точності формул Єврокоду 3 для розрахунків зварних швів [16].

Наразі актуальним залишається питання ефективного використання матеріалів різних класів міцності. Зазвичай вибір матеріалів для трубобетонних елементів здійснюють за їхнім призначенням і розрахунковими параметрами. У мостобудуванні широко застосовують низьколеговані сталі класів у діапазоні S235–S390. Для бетонних та залізобетонних елементів перевагу надають важкому бетону, зазвичай класів від C20/25 до C50/60, причому його вибір часто узгоджують із класом сталі: що вищий клас сталі, то вищий клас бетону [13]. У деяких випадках, наприклад, у великопрогонових мостах, використовують сталі класу Q420 (аналог S420) та бетон до класу C80 [20]. Водночас досліджень, які б детально аналізували ефективність вибору конкретного класу міцності сталі та бетону на поведінку вузлів, наразі не існує.

Попри численні дослідження трубобетонних вузлових з'єднань, досі потрібні додаткові експерименти для підтвердження та оцінки їхньої поведінки без додаткових методів їх підсилення в різних комбінаціях класів міцності матеріалів. Найпоширенішими

вузлами в решітках є К-, N- та ТК-подібні, проте більшість досліджень зосереджено саме на К-подібних вузлах, які є актуальними та були обрані для проведення дослідження в межах цієї статті [12].

### Мета

Автори ставлять за основну мету статті аналіз напружено-деформованого стану К-подібних вузлів за допомогою програмного моделювання з урахуванням нелінійних характеристик матеріалів. Розглянуто вплив масштабу моделей, класів бетону та сталі на напружено-деформований стан, а також оцінку їх ефективності. У дослідженні використано поширеними матеріали сталі та бетону, які часто використовують у практиці будівництва в Україні. Їх властивості задано відповідно до чинних будівельних норм.

За допомогою методу скінченних елементів продемонстровано методіку реалізації розрахунку та перевірки К-подібних вузлів для мостових конструкцій. Виконано порівняння результатів деформування комп'ютерної моделі з результатами лабораторних досліджень подібних зразків, проведених іншими авторами.

### Методика

*Матеріали.* Для проведення дослідження використано два максимально віддалені класи сталі та важкого бетону за міцністю. Характеристики бетону обрано відповідно до ДБН В.2.6–98:2009 [4], які найповніше описують властивості міцності та деформативності цього матеріалу. Найнижчим класом бетону обрано C16/20, що є мінімально допустимим для використання в головних несних елементах мостобудівництва, а найвищим – C50/60, який є максимальним класом, зазначеним у ДБН [4].

Попри наявність мостових нормативів, найбільш чіткі рекомендації щодо нелінійного розрахунку бетону також наведено в ДБН В.2.6–98:2009 [4]. Для опису поведінки бетону використано модель пластичності Друкера–Прагера. Цей метод добре підходить для моделювання руйнування крихких матеріалів, зокрема бетону. Крім того, застосований підхід дозволяє враховувати

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

пошкодження бетону, що є ефективним для оцінки матеріалу як під дією різних етапів навантаження, так і для його аналізу під час циклічних випробувань.

Для реалізації методу Друкера–Прагера було обрано підхід, виконаний та візуально продемонстрований професором цивільного будівництва Університету Міннесоти Дулут доктором Броком Хедегаардом [18]. За допомогою команд мови APDL у програмі ANSYS було налаштовано діаграму напруження-деформації бетону, відповідно до характеристичних значень параметрів одноосісного стиску  $f_{ck,cube}$ , розтягування  $f_{ctk,0,95}$ , модуля пружності  $E_{ck}$  та деформації стиску бетону за максимальних напружень  $\varepsilon_{cl,ck}$ . Згідно з ДБН [4], коефіцієнт Пуассона  $\nu$

допустимо брати рівним 0,2, а густину бетону визначено як  $2\,500\text{ кг/м}^3$ .

Для налаштування матеріалу бетону за цим підходом потрібно додатково задати 11 параметрів, які наведено в табл. 1. Параметр двовісної міцності бетону  $f_{ck,c}$  визначено на основі стандартної кореляції між двовісною та одноосісною міцністю на стиск:  $f_{ck,c} = 1,15 \times f_{ck,cube}$ . Це значення є репрезентативним, його широко використовують як загальноприйняте. Для визначення параметра мінімальної площі нелокальної поведінки використовують умову  $c > 4 \times L^2$ , де  $L$  позначає розмір мінімальної сторони скінченного елемента бетонної складової в міліметрах. Решту параметрів підібрано в межах рекомендованих значень для отримання необхідної форми кривої.

Таблиця 1

Додатково взяті значення параметрів для налаштування властивостей бетону

Table 1

Additionally, the values of the parameters for setting the properties of concrete were taken

Назва	Позначення	Од. виміру	Типове, рекомендоване значення	Взяті значення для бетону класу	
				C16/20	C50/60
Двовісна міцність	$f_{ck,c}$	МПа	$1,15 \times f_{ck,cube}$	$23 \times 10^6$	$69 \times 10^6$
Межа стиснення	$\sigma_v^c$	МПа	Від $-2/3 \times f_{ck,c}$ до $-f_{ck,c}$	$-23 \times 10^6$	$-69 \times 10^6$
Коефіцієнт обмеження стиснення	$R$	Безрозмірний	2	2	2
Константа зміцнення	$D$	МПа	Від $1 \times 10^{16}$ до $5 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{16}$
Зміцнення під час розтягу	$R_T$	Безрозмірний	1	1	1
Межа накопичення пошкоджень під час розтягу	$\gamma_{t0}$	Безрозмірний	0	0	0
Межа накопичення пошкоджень під час стиснення	$\gamma_{c0}$	Безрозмірний	Від $1 \times 10^{-5}$ до $1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{-5}$
Розвиток пошкоджень під час розтягу	$\beta_t$	Безрозмірний	$1,5 \times \beta_c$	6 000	6 000
Розвиток пошкоджень під час стиснення	$\beta_c$	Безрозмірний	Від 1 000 до 10 000	4 000	4 000
Площа нелокальної поведінки	$c$	мм <sup>2</sup>	$> 4 \times L^2$	8 000	8 000
Наднелокальний параметр	$m$	Безрозмірний	Від 1 до 3	2	2

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

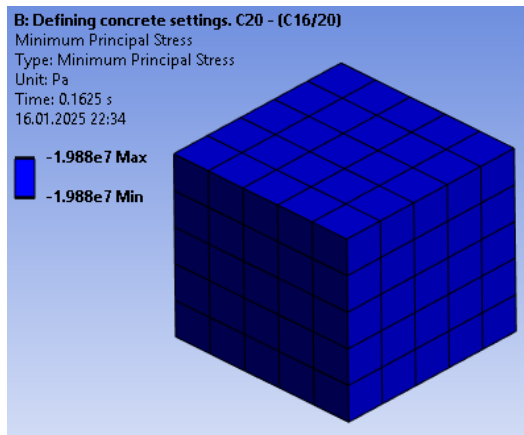


Рис. 1. Мінімальні головні напруження в кубіку з бетону класу C16/20 під час одновісного стискання

Fig. 1. Minimum principal stresses in a cube of concrete of class C16/20 during uniaxial compression

Діаграми бетонів визначено шляхом стиску та розтягу моделі кубіка (рис. 1), при цьому двовісний стиск визначено обмеженням переміщення по нормалі двох паралельних бічних граней. За загальними правилами оцінку напружено-деформованого стану класичного бетону рекомендують виконувати за головними напруженнями, що враховано під час визначення діаграм для бетонів C16/20 та C50/60, зображених на рис. 2. Оскільки під час побудови діаграм цим методом існує багато наближених змінних, точне її узгодження з вхідними показниками не є можливим та необхідним. Відповідно, ці діаграми

налаштовано з максимальним наближенням до референтних значень, порівняння з якими наведено в табл. 2, де найбільше відхилення склало 2,22 %.

Для головних несних елементів мостів найчастіше використовують низьколеговані сталі. Відповідно до ДБН В.2.3–14:2006 [2], для використання дозволені сталі марок 16Д і 10ХСНД. Ці сталі широко застосовують у будівництві, вони суттєво відрізняються за міцністю, що має важливе значення для цього експерименту.

Низьколегована сталь не має чітко вираженої полицки плинності  $\sigma_T$ . Для порівняння діаграма на рис. 3, а ілюструє поведінку матеріалу зразків із маловуглецевої сталі, наприклад, Ст2 і Ст3, для яких характерна яскраво виражена ділянка плинності (точка С). Натомість діаграма на рис. 3, б відображає результати випробувань зразків із низьколегованої сталі, такої як 09Г2, 10ХСНД [10].

Значення граничних деформаційно-міцнісних параметрів сталей отримано з ДСТУ 8817:2018 [5] та наведено в табл. 3. Саму ж форму діаграми описано лінійною функцією до межі пропорційності  $\sigma_{пл}$  як  $R_y/E$  та квадратичними функціями, що виходять із точок межі плинності  $R_y$  і тимчасового опору  $R_u$  (рис. 4).

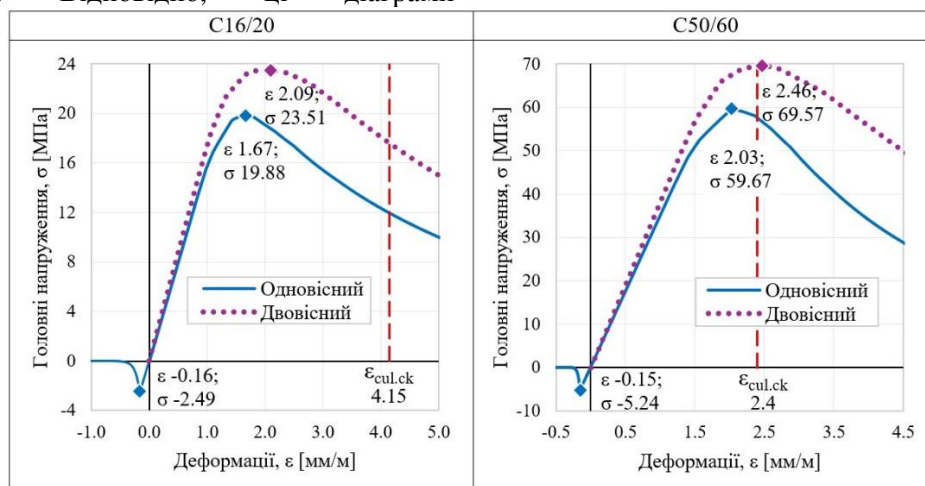


Рис. 2. Розрахункові діаграми напруження-деформації бетонів на одновісний стиск-розтяг та двовісний стиск

Fig. 2. Design stress-strain diagrams of concrete for uniaxial compression-tension and biaxial compression

Таблиця 2

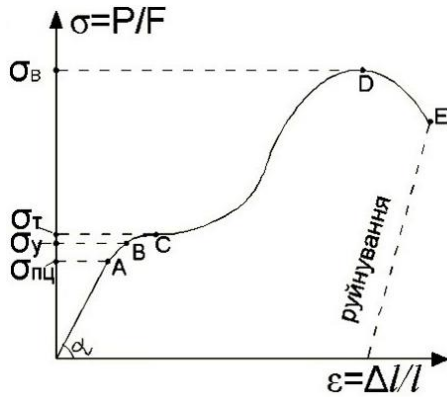
Порівняння отриманих граничних параметрів бетону з референтними

Table 2

Comparison of the obtained concrete limit parameters with the reference ones

Клас бетону	Міцність [МПа]						Деформації [мм/м]		
	Одновісний стиск / розтяг			Двовісний стиск			Одновісний стиск		
	$f_{ck,cube} / f_{ctk,0.95}$	Фактич.	$\Delta$ [%]	$f_{ck,c}$	Фактич.	$\Delta$ [%]	$\epsilon_{cl,ck}$	Фактич.	$\Delta$ [%]
C16/20	20,00 / 2,50	19,88 / 2,49	0,60/ 0,40	23,00	23,51	2,22	1,66	1,67	0,60
C50/60	60,00 / 5,30	59,67 / 5,24	0,55/ 1,13	69,00	69,57	0,83	2,02	2,03	0,50

a – a



б – б

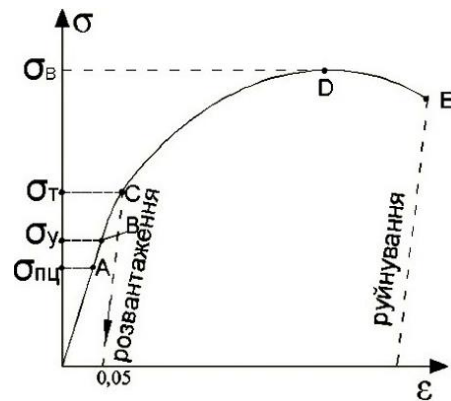


Рис. 3. Діаграми розтягування зразків з маловуглецевої сталі (а) і низьколегованої сталі (б) [13]

Fig. 3. Tensile diagrams of low-carbon steel specimens (a) and low-alloy steel specimens (b) [13]

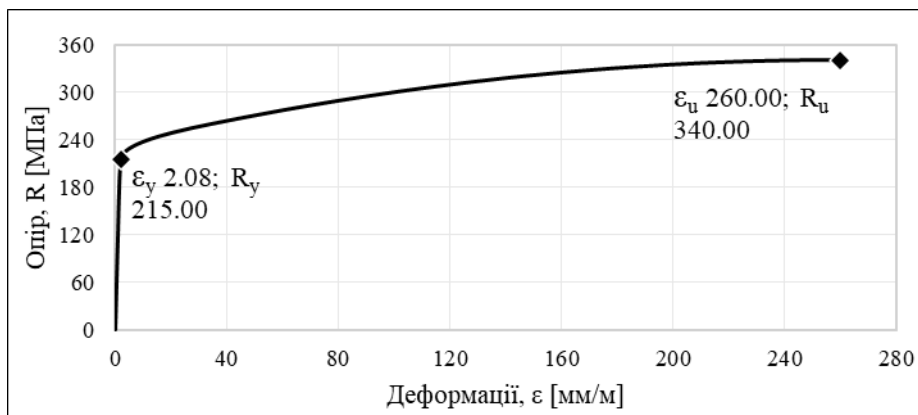


Рис. 4. Розрахункова діаграма деформування сталі 16Д

Fig. 4. Design diagram of deformation of 16D steel

## Параметри сталі

Table 3

## Steel parameters

Марка сталі	$R_y$ [МПа]	$\epsilon_y$ [мм/м]	$R_u$ [МПа]	$E$ [ГПа]	$\nu$	$\delta$
16Д	215	2,08	340	206	0,3	0,26
10ХСНД	350	3,04	470	206	0,3	0,19

Побудовані діаграми було додано до властивостей матеріалу в програмі ANSYS за допомогою вбудованого інструменту багатолінійного ізотропного зміцнення.

Модуль пружності  $E$  прокатної сталі взято рівним 206 ГПа відповідно до ДБН [2] та ДБН В.2.6–198:2014 [3]. Коефіцієнт Пуассона  $\nu$  для сталі взято рівним 0,3, а її густину – 7 850 кг/м<sup>3</sup> [3].

Властивості зварних швів, що з'єднують розкоси та пояс, взято такими ж, як і властивості конструкційної сталі, застосованої для труб.

*Моделювання.* У цьому дослідженні розглянуто К-подібні вузли з порожнистими та бетононаповненими поясами без додаткового посилення. Такі з'єднання є одним із найпоширеніших типів, які використовують у решітках аркових склепінь мостів та фермах. Основою для дослідження цих вузлів став лабораторний експеримент, проведений Венцзін Хуаном та ін. [16].

Для чисельного експерименту було підготовлено дві геометричні моделі вузлів. Вони мають однакове співвідношення між розмірами, проте зі зміною діаметра непропорційно змінюється внутрішня площа перерізу труб, що може вплинути на результати. Загалом підготовлено 12 зразків для розрахунку, параметри яких наведено в табл. 4 та проілюстровано на рис. 5. Код зразка відображає ключові зміни в характеристиках моделі вузла та містить позначення у форматі зовнішній «діаметр пояса» – «марка сталі» – «клас бетону». Відсутність параметра «клас бетону» в коді зразка означає, що він є порожнистим, тобто не містить бетону в поясі вузла.

Зовнішні діаметри трубобетонних елементів визначено на основі параметрів реальних мостів. Найменший діаметр труби становить 550 мм (арковий міст Ши-Тан-Сі [14]), а найбільший – 1 220 мм (Ушанський арковий міст через річку Янцзи [9]). Для зручності ці значення було округлено: максимальний розмір зменшено до 1 200 мм, а мінімальний – до 400 мм, щоб підсилити можливий ефект і забезпечити кратність. Крім того, діаметр 1 200 мм є наближеним до максимального значення, наведеного в ДСТУ EN 10219–2:2009 [6].

Розрахункові довжини елементів наближені до значення  $4 \times d$ , що виключає можливість загальної втрати стійкості та дозволяє уникнути локалізованих ефектів у зоні прикладення навантажень. Ексцентриситет з'єднання дорівнює нулю для кожного зразка, що забезпечує збіг центральних ліній розкосів і пояса та дозволяє знехтувати вторинними згинальними моментами.

Більшість розмірів призначено на основі пропорцій згідно з дослідженням Венцзін Хуана та ін. [16], значення яких описано далі. Діаметр розкосів визначено як  $0,44 \times D$  від діаметра пояса. Товщина труб трубобетонних елементів становить  $T=1/50 \times D$ , що відповідає

$$\text{умові} \quad \frac{D}{T} \geq 90 \times \frac{235}{R_y} \quad \text{згідно}$$

з ДСТУ Н Б EN 1994–2:2012 [8]. Товщина труб розкосів дорівнює  $t = 1/29,33 \times d$ , що не є меншою за мінімальне значення  $t_{\text{spec.min}} = 4,8$  відповідно до ДСТУ–Н Б EN 1993–4–3:2012 [7],

а також задовольняє умові  $\frac{d}{t} \geq R_y$ . Також

згідно з [16], кут між розкосами взято рівним 60°, а катети зварних швів дорівнюють подвійній товщині розкосів.

Таблиця 4

## Інформація про зразки моделей вузлів

Table 4

## Information about sample node models

Код зразка	$D$ [см]	Марка сталі	Клас бетону	$T$ [см]	$L$ [см]	$d$ [см]	$t$ [см]	$l$ [см]	$g$ [см]
D40–16Д–С20	40	16Д	C16/20	0,8	160	17,6	0,6	67,3	2,8
D40–16Д–С60			C50/60						
D40–16Д			–						
D40–10ХСНД–С20		10ХСНД	C16/20						
D40–10ХСНД–С60			C50/60						
D40–10ХСНД			–						
D120–16Д–С20	120	16Д	C16/20	2,4	480	52,8	1,8	201,9	8,3
D120–16Д–С60			C50/60						
D120–16Д			–						
D120–10ХСНД–С20		10ХСНД	C16/20						
D120–10ХСНД–С60			C50/60						
D120–10ХСНД			–						

Позначення:

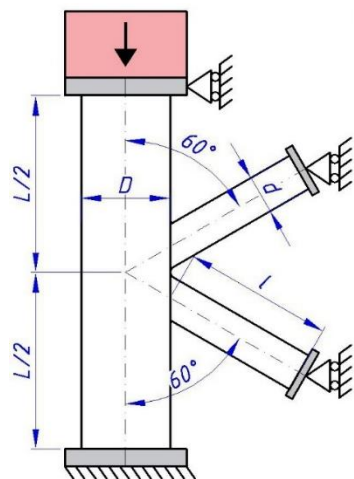
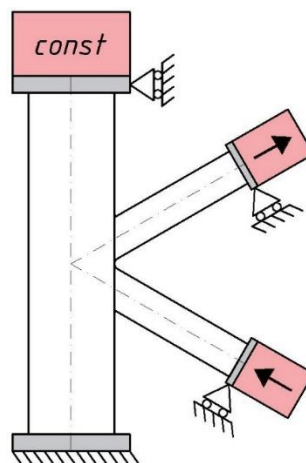
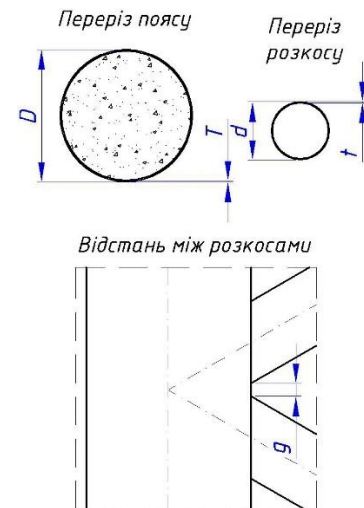
 $D$  – зовнішній діаметр пояса; $T$  – товщина труби пояса; $L$  – повна довжина пояса; $t$  – товщина труби розкошу; $l$  – повна довжина розкошу; $g$  – зазор між розкосами. $a - a$  $b - b$  $v - c$ 

Рис. 5. Схема розрахункових моделей на першій (а) та другій (б) стадії завантаження.

Додаткові відомості про модель (в)

Fig. 5. Schematic of the computational models at the first (a) and second (b) stages of loading. Additional information about the model (c)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

*Граничні умови та завантаження.* Як і в експерименті Венцзінь Хуана та ін. [16], модель вузла завантажено у два етапи. На першому етапі (рис. 5, а) виконано лише завантаження пояса, що відображає реальну картину роботи вузла конструкції. Як було попередньо визначено, пояс завантажували силою  $N_{Ed}$  до стану, що становив приблизно  $1/4$  від його несної здатності  $N_{Rd}$ . Відповідно до цього, було окремо розраховано елементи поясів, після чого чверть визначеної критичної сили було прикладено до пояса моделі вузла. Аналіз напружень у вузлі на першому етапі завантаження показав, що напруження в трубах були вдвічі нижчими за межу плинності сталі. На другому етапі (рис. 5, б) виконано завантаження розкосів, за якого верхній розкіс розтягується, а нижній стискається до їхньої повної відмови. На цьому етапі завантаження пояса залишалося статично незмінним.

На першому кроці розрахунку моделі вузла всі вільні кінці елементів жорстко закріплено, за винятком їхнього переміщення в напрямку дії завантаження пояса. На другому етапі вільне переміщення розкосів відповідно змінюється на паралельне напрямку прикладених до них завантажень. Такі обмеження моделі дозволяють уникнути утворення вторинних моментів.

Додатково в розрахункових моделях вузлів враховано низку важливих деталей. Зокрема, взаємодія сталі та бетону моделюється фрикційним контактом із коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,2$ . Для забезпечення точності аналізу результатів попередньо підготовлено та рівномірно розподілено 13 точок уздовж крамок зварних швів (рис. 6). Крім того, розрахункова модель характеризується наявністю однієї вертикальної площини симетрії, що дозволило спростити обчислення скороченням часу розрахунків. Кінцеву розрахункову модель із розбиттям на скінченні елементи показано на рис. 7. Загальна кількість скінчених елементів у кожній моделі вузла налаштована з метою забезпечення однаковості та точності результатів і складає в межах  $4\ 6476 \div 4\ 6517$  шт.

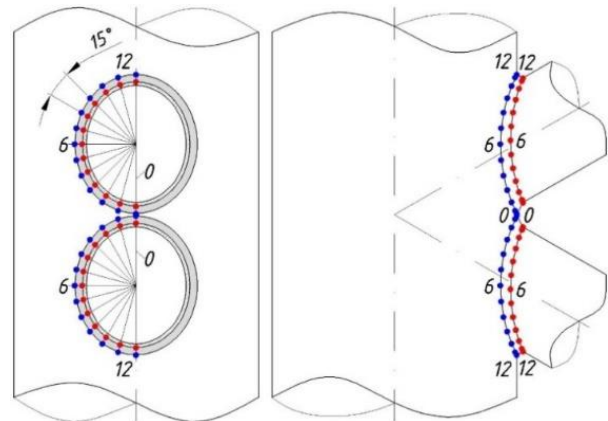


Рис. 6. Положення точок на зварному шві для аналізу результатів

Fig. 6. Position points on the weld to analyze the results

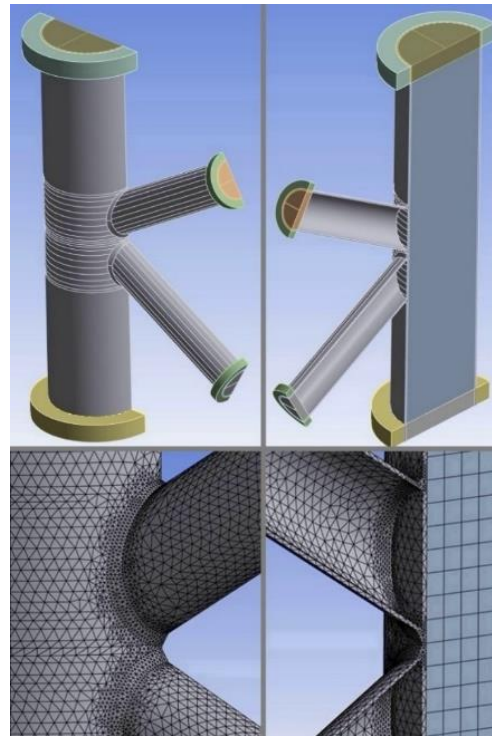


Рис. 7. Модель бетононаповненого зразка та її розбиття на скінченні елементи

Fig. 7. Model of a concrete-filled specimen and its breakdown into finite elements

## Результати

Результати розрахунків для порожнистих зразків вузлів показують, що форма деформування узгоджується з результатами лабораторного експерименту [16] (рис. 8). Через жорсткіші умови закріплення моделей

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

і використання інших матеріалів, відмінних від зазначених у [16], концентрація напружень змістилася в контур зварного шва, розташованого на поясі, а не на розкосі. Цей випадок можна розглядати як один із можливих варіантів руйнування вузла. Загальну форму деформування зразків вузла на першому та другому етапах показано на рис. 9.

Із діаграм залежності навантаження-деформування стиснених розкосів (рис. 10) спостерігаємо суттєвий вплив бетонного заповнення на їхню роботу. Для розтягнутих розкосів також зафіксовано збільшення жорсткості елементів, але воно є менш суттєвим, що відповідає багатьом проведеним дослідженням. У табл. 5 наведено точні значення граничних навантажень на межі плинності, де ця межа першочергово настає якраз у зоні з'єднання розкосів із поясом.

У моменти досягнення межі плинності сталі головні напруження в бетоні не перевищують

межу його міцності на двовісний стиск та одновісний розтяг у жодному зразку вузла (табл. 5). Розподіл напружень у бетоні залишається однаковим для кожного зразка, що проілюстровано на одному із зразків (рис. 11).

Перш ніж обговорювати вплив сталі або розміру вузла на результати, необхідно оцінити найбільш впливову змінну в межах однієї групи зразків – силу впливу бетону, визначену на основі даних із табл. 5, результати яких наведено в табл. 6. Порівняння порожнистих зразків із заповненими бетоном С16/20 демонструє суттєве зростання несної здатності для стиснутих і розтягнутих розкосів. Водночас порівнянню бетононаповнених зразків між собою показує, що вплив бетону С50/60 на стиснуті та розтягнуті розкоси суттєво відрізняється: якщо для розтягнутих розкосів ефект не перевищує 5,2 %, то для стиснутого розкосу в деяких зразках він сягає 20,8 %.

*a – a*



*b – b*

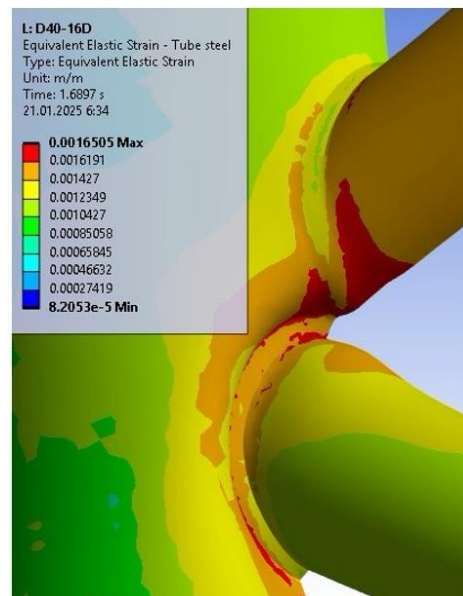


Рис. 8. Режим руйнування розкосів у порожнистих вузлах:  
*a* – за дослідженням Венцзін Хуана та ін. [16]; *b* – зразка D40–16D у масштабі 1:1

Fig. 8. Failure mode of braces in hollow nodes:  
*a* – according to the study of Wenjin Huang et al. [16]; *b* – sample D40–16D in a scale of 1:1

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

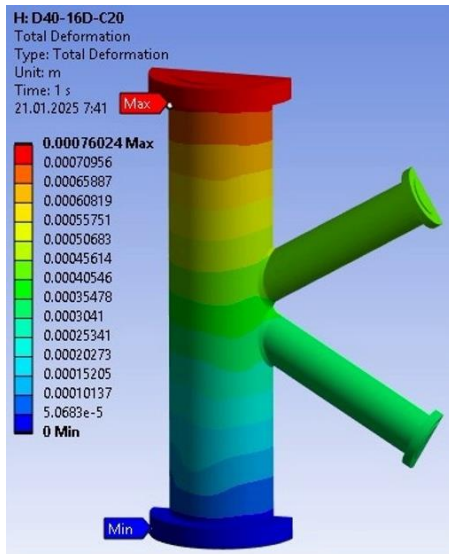
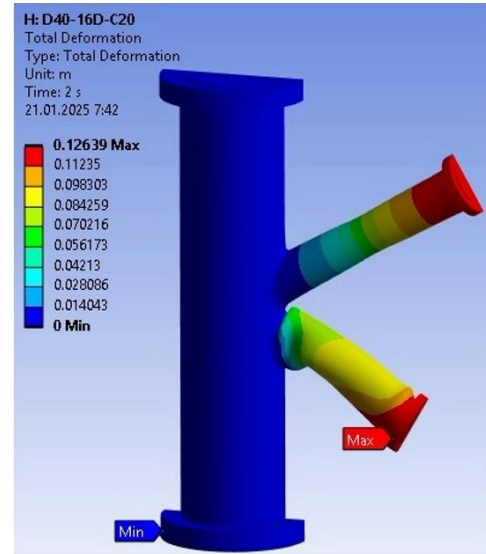
*a – a**b – b*

Рис. 9. Сумарні деформації вузла D40–16Д–С20 у масштабі 1:1:  
*a* – на першому етапі навантаження; *b* – наприкінці другого етапу навантаження

Fig. 9. Total deformations of the D40–16D–C20 assembly on a 1:1 scale:  
*a* – at the first stage of loading; *b* – at the end of the second stage of loading

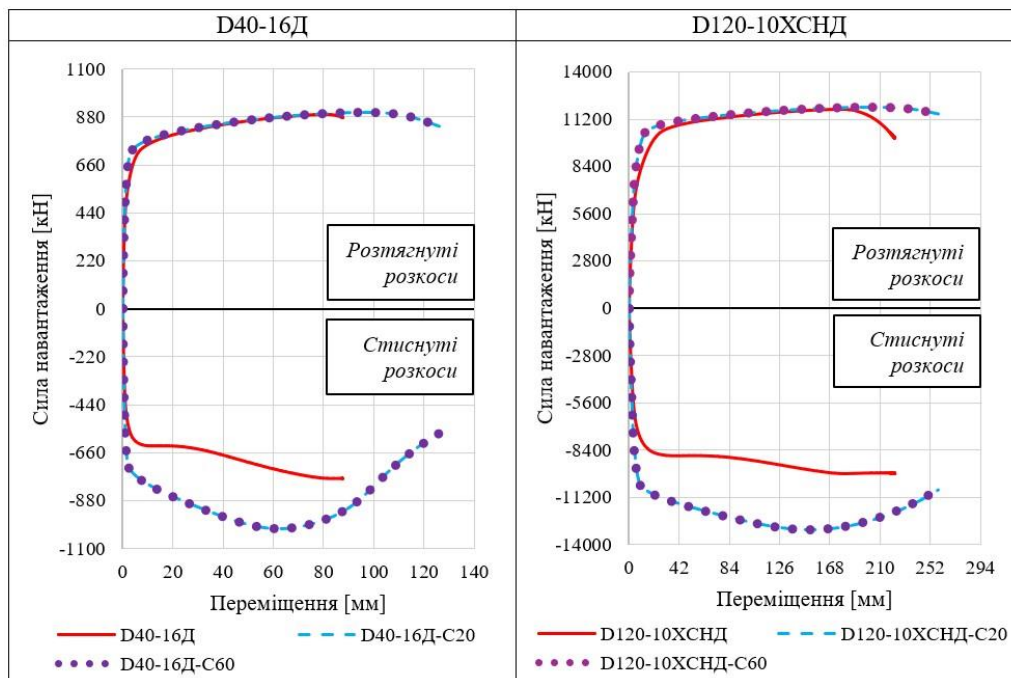


Рис. 10. Осьова деформація розкосів у деяких групах зразків

Fig. 10. Axial deformation of braces in some groups of samples

Порівняння бетононаповнених зразків D40–16D–C60 і D40–16D–C20 показує зменшення несної здатності розкосів у першому, що свідчить про зниження ефективності

використання бетону C50/60 порівнянно з класом C16/20.

Вплив марки сталі або розміру вузла на ефективність використання певного класу

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

бетону відображає ефективність відповідної складової, яку наведено в табл.7. Ключові відмінності такі:

– У разі збільшення розміру вузла зі сталі 16Д ефективність використання бетону класу С16/20 для розтягнутого розкосу зменшується на 6,6 %. Натомість для сталі 10ХСНД суттєвих змін не зафіксовано – приріст становить лише 0,1 %. Для стиснутих розкосів збільшення розміру вузла забезпечує приріст ефективності на 12 % незалежно від марки сталі.

– Ефективність використання бетону класу С50/60 порівняно з С16/20 в разі збільшення розміру вузла зі сталі марки 16Д зростає до 7 % для обох різнонавантажених розкосів. У той же час для вузлів зі сталі марки 10ХСНД суттєвого приросту ефективності в розтягнутому розкосі не спостерігається (0,8 %), а в стиснутих вона зменшується на 3,7 %.

– Ефективність використання бетону С16/20 у разі збільшення класу міцності сталі у вузлах розмірів D40 та D120 забезпечує приріст ефективності в межах 8,0–8,6 %. Винятком

є розтягнутий розкіс у вузлі розміром D40, де ефективність використання становить лише 1,3 %.

– У випадку збільшення класу сталі вузла розміром D40 ефективність використання бетону класу С50/60 порівняно з С16/20 для розтягнутого розкосу становить 6,7 %, тоді як для вузла розміром D120 будь-які зміни майже відсутні (приріст 0,6 %). Для стиснутих розкосів ефективність сталі 10ХСНД із розміром вузла D40 зросла на 22,8 %, однак у вузлі розміром D120 ефект знизився до 10,8 %.

Оцінку напружено-деформованого стану сталевих складових вузла виконано відповідно до рекомендацій ДБН В.1.2–14:2018 [1], у яких для ізотропних матеріалів у разі плоского або просторового напруженого стану запропоновано використовувати напруження за критерієм Мізеса. Подальший аналіз еквівалентних напружень виконано з урахуванням знаків.

Таблиця 5

Значення осевого навантаження на розкоси в разі досягнення межі плинності сталі у вузлі

Table 5

## Axial load on braces in case of reaching the yield strength of steel in the assembly

Код зразка	Осьове навантаження на розтягнутий розкіс на межі $R_y$ [кН]	Осьове навантаження на стиснутий розкіс на межі $R_y$ [кН]	Мінімальні головні напруження в бетоні за $R_y$ в розтягнутих розкосах [МПа]	Максимальні головні напруження в бетоні за $R_y$ у стиснутих розкосах [МПа]
D40–16D–C20	444,3	366,7	$13,7 < f_{ck,c} = 23$	$1,21 < f_{ctk,0,95} = 2,50$
D40–16D–C60	434,7	360,9	$26,3 < f_{ck,c} = 69$	$1,91 < f_{ctk,0,95} = 5,30$
D40–16D	352,3	335,2	–	–
D40–10HSND–C20	748,8	643,4	$22,1 < f_{ck,c} = 23$	$1,21 < f_{ctk,0,95} = 2,50$
D40–10HSND–C60	781,7	777,4	$34,2 < f_{ck,c} = 69$	$1,94 < f_{ctk,0,95} = 5,30$
D40–10HSND	585,9	543,3	–	–
D120–16D–C20	3 510,6	3 561,2	$13,4 < f_{ck,c} = 23$	$1,03 < f_{ctk,0,95} = 2,50$
D120–16D–C60	3 673,1	3 743,2	$27,2 < f_{ck,c} = 69$	$3,45 < f_{ctk,0,95} = 5,30$
D120–16D	2 980,6	2 898,7	–	–
D120–10HSND–C20	6 015,0	6 143,9	$19,7 < f_{ck,c} = 23$	$0,95 < f_{ctk,0,95} = 2,50$
D120–10HSND–C60	6 328,3	7 152,4	$33,3 < f_{ck,c} = 69$	$3,18 < f_{ctk,0,95} = 5,30$
D120–10HSND	4 700,8	4 631,5	–	–

Таблиця 6

**Ефективність впливу класу бетону  
на роботу розкосів**

Table 6

**Effectiveness of the concrete class influence  
on the operation of struts**

Код зразка	Розтягнутий розкіс [%]	Стиснутий розкіс [%]
Порівняння порожнистих зразків із бетононаповненими в межах окремої групи		
D40–16D–C20 / D40–16D	26,1	9,40
D40–10HSND–C20 / D40–10HSND	27,8	18,4
D120–16D–C20 / D120–16D	17,8	22,9
D120–10HSND–C20 / D120–10HSND	28,0	32,7
Порівняння бетононаповнених зразків у межах окремої групи		
D40–16D–C60 / D40–16D–C20	–2,2	–1,6
D40–10HSND–C60 / D40–10HSND–C20	4,4	20,8
D120–16D–C60 / D120–16D–C20	4,6	5,1
D120–10HSND–C60 / D120–10HSND–C20	5,2	16,4

Таблиця 7

**Вплив розміру вузла та марки сталі  
на роботу розкосів**

Table 7

**Effect of assembly size and steel grade  
on brace performance**

Назва		Розтягнутий розкіс [%]	Стиснутий розкіс [%]
Ефективність розміру вузла D120 відносно D40 на основі порівняння порожнистого зразка із заповненим бетоном C16/20 зі сталі:	16Д	–6,6	12,3
	10ХСНД	0,1	12,0
Ефективність розміру вузла D120 відносно D40 на основі порівняння зразків, заповнених бетоном C16/20 та C50/60, зі сталі:	16Д	6,9	6,8
	10ХСНД	0,8	–3,7
Ефективність марки сталі 10ХСНД відносно 16Д на основі порівняння порожнистого зразка із заповненим бетоном C16/20, діаметром:	D40	1,3	8,2
	D120	8,6	8,0
Ефективність марки сталі 10ХСНД відносно 16Д на основі порівняння зразків, заповнених бетоном C16/20 та C50/60, діаметром:	D40	6,7	22,8
	D120	0,6	10,8

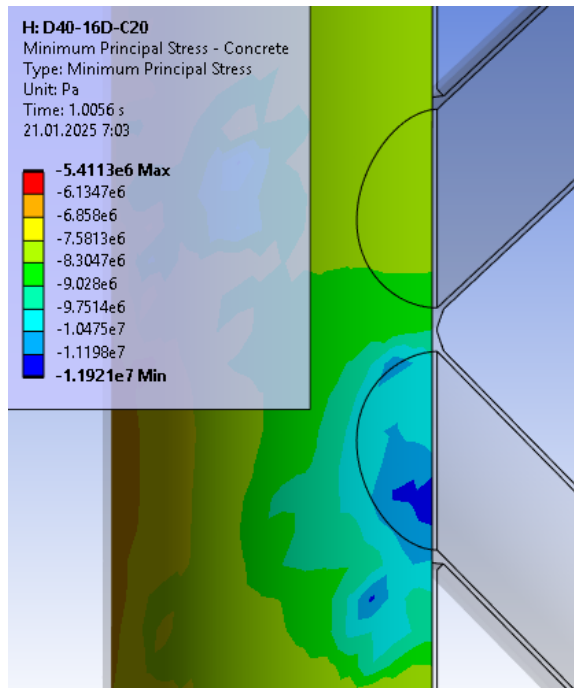


Рис. 11. Розподіл напружень у бетоні в бетононаповнених зразках

Fig. 11. Stress distribution in concrete in concrete-filled specimens

На графіках рис. 12, побудованих за відміченими точками на рис. 6, показано міру наближення отриманих напружень до межі плинності, що дає більш чітку картину для аналізу. Розглядаючи всі порожнисті зразки (рис. 12, а), бачимо, що наближення до граничних значень у розтягнутих і стиснутих розкосах відбувається в межах 8–10 точок кромки зварного шва на поясі. Якщо у верхніх кромках зварного шва наближення до максимальної точки напруження зростають лінійно, то для кромки на поясі тренд графіка має більш випуклу форму.

Графіки бетононаповнених вузлів (рис. 12, б, в), показують, що наявність бетону сприяє більш рівномірному розподілу напружень, що виникають як по верхніх, так і

по нижніх контурах зварного шва, але тільки для розтягнутих розкосів. Для стиснутих розкосів тенденція не змінилася, але, як зазначено вище, несна здатність була збільшена. Хоча тенденція кривих між бетонами С16/20 та С50/60 збігається, форма кривих має деякі відмінності. Вплив на форму розподілу напружень спостерігається лише від зміни розміру вузла, тоді як вплив бетону або сталі є мінімальним. Також на графіках бетононаповнених вузлів під напружень у наближених зонах особливо не змінився, хоча в кромках на стиснутих та розтягнутих розкосах мінімальні напруження розподілилися більш рівномірно.

### Наукова новизна та практична значимість

У роботі проведено комплексний аналіз впливу матеріалів та геометричних параметрів вузлів із бетонними поясами на роботу порожнистих розкосів. Особливу увагу приділено малодослідженому фактору розміру вузла, пропорційна зміна якого впливає на нелінійну зміну площі перерізу бетонного ядра в поясі.

На основі проведеного скінченно-елементного нелінійного аналізу, із застосуванням нормативної бази України та імплементованих європейських стандартів, встановлено закономірності, які дозволяють оптимально підбирати класи бетону та сталі для вузлів. Це забезпечує ефективне функціонування конструкцій залежно від типу навантаження та умов експлуатації, а також сприяє зниженню витрат на матеріали. Результати дослідження є важливими для створення сучасних будівельних конструкцій, підвищення їх надійності, ефективності та економічності.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

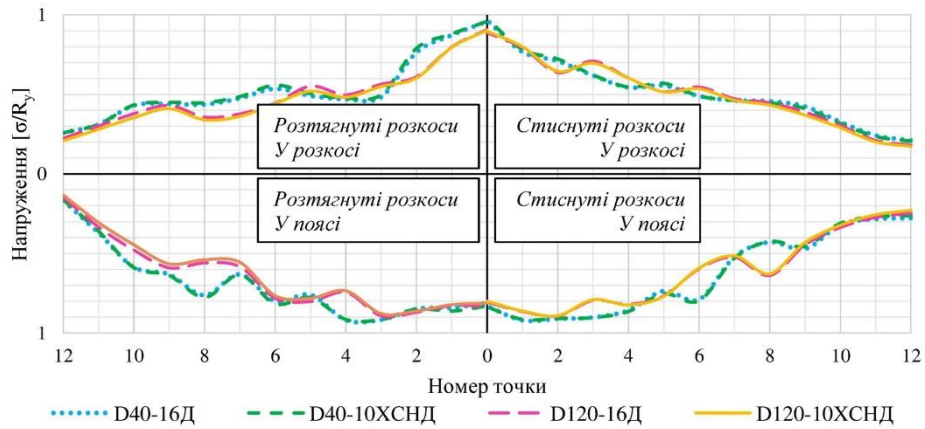
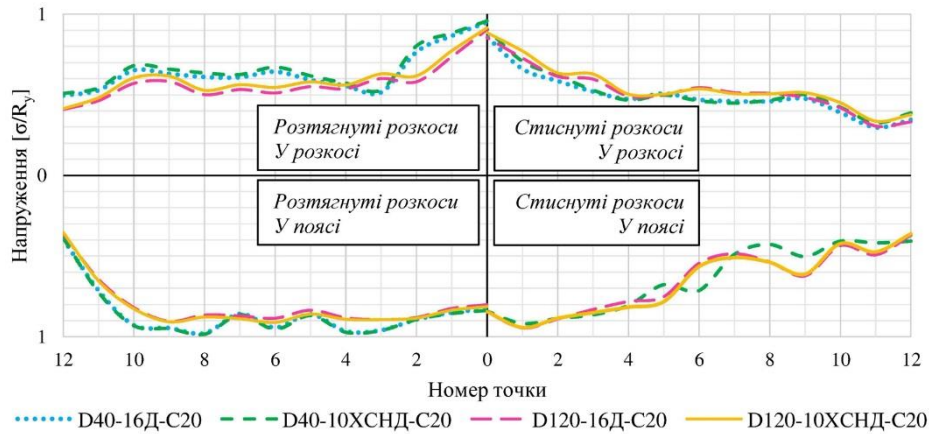
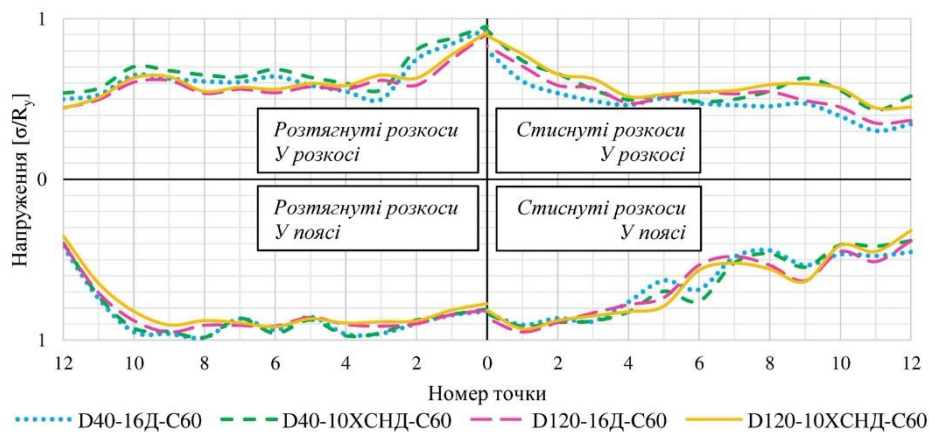
*a – a**б – б**в – в*

Рис. 12. Розподіл напружень у кромках зварних швів:

*a)* у порожніх зразках; *б)* у зразках заповнених бетоном С20; *в)* у зразках заповнених бетоном С60

Fig. 12. Stress distribution in the weld edges:

*a)* in hollow specimens; *b)* in specimens filled with C20 concrete; *c)* in specimens filled with C60 concrete

### Висновки

Проведено комплексну оцінку впливу матеріалів, які застосовують у мостобудуванні, на роботу круглих трубчастих вузлів із бетоноповненим поясом решітки, а також проаналізовано вплив розмірів цих вузлів. Розглянуто два класи міцності бетону (С16/20 та С50/60) і дві марки сталі (16Д та 10ХСНД), що дозволило оцінити поведінку матеріалів у крайніх умовах експлуатації. Для бетону було застосовано модель пластичності Друкера–Прагера, яка враховує пошкодження матеріалу та його нелінійну поведінку, тоді як нелінійну поведінку сталі змодельовано за допомогою інструменту багатолінійного ізотропного зміцнення.

Основний акцент зроблено на чисельному моделюванні К–подібних вузлів, характерних для аркових і фермових мостів. Розроблено 12 варіантів моделей вузлів із різними параметрами діаметра, класу бетону та марки сталі. Завантаження вузлів здійснено у два етапи: спочатку проведено початкове навантаження пояса, а потім – подальше навантаження розкосів до їхньої повної відмови.

Дослідження підтвердило значний вплив бетонного заповнення на несну здатність К–подібних вузлів. Зокрема, з'ясовано, що заповнення поясу бетоном класу С16/20 суттєво підвищило жорсткість стиснутих розкосів (до 32,7 %), тоді як для розтягнутих розкосів цей ефект є менш вираженим (до

28 %). Водночас використання високоміцного бетону класу С50/60 не завжди є доцільним, оскільки в деяких випадках його ефективність виявляється нижчою порівняно з бетоном класу С16/20. Детальний аналіз напружено–деформованого стану зварних швів показав, що бетон сприяє більш рівномірному розподілу напружень у з'єднанні, однак розташування та розгладжування пікових значень у розтягнутих розкосах не відбувається.

Залежність ефективності використання бетону від розміру вузла та марки сталі була також чітко виражена. Зі збільшенням розміру вузла ефективність бетону для розтягнутих розкосів у разі використання сталі марки 16Д коливається в межах від –6,6 до 6,9 %, тоді як для сталі марки 10ХСНД зміни та коливання практично не спостерігаються. Загалом марка сталі має подібний вплив на розподіл напружень, як і зміни розміру, але в цьому випадку для міцнішої марки 10ХСНД не спостерігається зниження ефективності порівняно з маркою 16Д.

Отримані в цьому дослідженні результати дозволяють оптимізувати проектування сталевих вузлів, підвищують їхню надійність, довговічність та економічну ефективність. Зокрема, важливим фактором є не лише вибір марки сталі, але й розмір вузла, оскільки зі зміною його розмірів непропорційно змінюється площа поперечного перерізу бетону.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2–14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2022–09–01]. Київ, 2022. 34 с.
2. ДБН В.2.3–14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Чинний від 2007–02–01]. Київ, 2007. 218 с.
3. ДБН В.2.6–198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2022–09–01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2022. 298 с.
4. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2020–06–01]. Київ, 2020. 73 с.
5. ДСТУ 8817:2018. Прокат конструкційний з нелегованої та легованої сталі для мостобудування. Технічні умови [Чинний від 2019–01–01]. Київ, 2019. 9 с.
6. ДСТУ EN 10219–2:2009. Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій. Частина 2. Розміри, граничні відхилення та характеристики [Чинний від 2011–07–01]. Київ, 2011. 34 с.

7. ДСТУ–Н Б EN 1993–4–3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4–3. Трубопроводи (EN 1993–4–3:2007, IDT) [Чинний від 2013–07–01]. Київ, 2007. 77 с.
8. ДСТУ–Н Б EN 1994–2:2012. Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів (EN 1994–2:2005, IDT). Проект [Чинний від 2013–07–01]. Київ, 2005. 131 с.
9. Коломійчук Г. П., Майстренко О. Ф., Коломійчук В. Г., Коломійчук В. Г. Конструктивні рішення сучасних великопролітних трубобетонних аркових мостів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. № 13. С. 42–48. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775–2410–6208–2020–3\(13\)–05](https://doi.org/10.36910/6775–2410–6208–2020–3(13)–05)
10. Коростильов Л. І., Лугінін О. Є., Спіхтаренко В. В., Терлич С. В. *Опір матеріалів*: навчальний посібник. Миколаїв : Видавництво НУК, 2017. 300 с.
11. Співак Д. С., Ключник С. В. Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301524>
12. Aswathi Dev. K. K., Preetha Prabhakaran, Neethu S. Analytical Study on Fatigue Behaviour of Steel Truss Girder Joints. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2015. Vol. 2. Iss. 10. P. 574–578.
13. Chen B.–C., Wang T.–L. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2009. Vol. 14. Iss. 2. P. 70–80. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084–0680\(2009\)14:2\(70\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084–0680(2009)14:2(70))
14. Ferrotto M. F., Fenu L., Xue J.–Q., Briseghella B., Chen B.–C., Cavaleri L. Simplified equivalent finite element modelling of concrete–filled steel tubular K–joints with and without studs. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 266. P. 114634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114634>
15. Huang W., Fenu L., Chen B., Briseghella B. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 141. P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020>
16. Huang W., Fenu L., Chen B., Briseghella B. Experimental study on K–joints of concrete–filled steel tubular truss structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 107. P. 182–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.023>
17. Joseph J. R., Henderson J. H. Concrete–filled steel tube truss girders—a state–of–the–art review. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023. Vol. 70, No. 49. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s44147–023–00220–w>
18. Structures with Prof. H. Concrete Microplane Model – FEA using ANSYS – Lesson 10. *YouTube*. 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=JXbZnhGZliY>
19. Tian Z., Liu Y., Jiang L., Zhu W., Ma Y. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019. Vol. 6. Iss. 1. P. 94–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001>
20. Wu Y., Wang X., Fan Y., Shi J., Luo C., Wang, X. A Study on the Ultimate Span of a Concrete–Filled Steel Tube Arch Bridge. *Buildings*. 2024. Vol. 14. Iss. 4. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040896>

D. S. SPIVAK<sup>1\*</sup>, S. V. KLIUCHNYK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 200 07 64, e-mail [d.s.spivak@ust.edu.ua](mailto:d.s.spivak@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-8155-7497

<sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail [s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua](mailto:s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua), ORCID 0000-0001-7771-8377

## Influence of Materials and Scale Factor on Failure of K-shaped Nodes of Pipe Concrete Bridges: Effectiveness of Design Parameters

**Purpose.** The paper aims to analyze the stress-strain state of K-shaped nodes of pipe-concrete structures using finite element modeling with consideration of nonlinear characteristics of materials, which, in turn, requires an assessment of the influence of materials and node sizes on the operation of hollow braces in lattice bridge structures.

**Methodology.** Numerical modeling of the stress-strain state of K-shaped nodes of pipe concrete belts in the ANSYS program was performed. Two classes of concrete (C16/20 and C50/60) and two steel grades (16D and 10HSND)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

were used for the analysis, which were modeled using the Drucker–Prager plasticity criterion for concrete and the multilinear isotropic strengthening tool for steel. We prepared 12 variants of the node models with different material characteristics and two dimensional scales. To approximate the real state, the assemblies were loaded in two stages: first, the belt was loaded, and then the braces were loaded until they failed. **Findings.** The calculations showed that the deformation of hollow specimens of nodes corresponds to the laboratory experiments of other authors. The effect of concrete filling on compressed and tensile braces was significant, especially for compressed braces, where the effect reached 20.8%. C50/60 concrete does not always improve performance, sometimes being inferior to C16/20 concrete. Increasing the node size has a positive effect on concrete efficiency, particularly for compressed struts, where the increase was up to 12.3%. Increasing the strength of steel from 16D to 10KhSND for tensile braces showed an efficiency of 0 to 8.6%, and for compressed braces - up to 22.8%. Stress plots along the weld showed that concrete helps to distribute stresses evenly in both compressed and tensile braces. **Originality.** The paper analyzes the influence of materials and geometry of steel assemblies partially filled with concrete on the performance of hollow braces, with special attention paid to the little-studied factor of the assembly size. **Practical value.** Thanks to the finite element nonlinear analysis and the application of Ukrainian regulations and European standards, the principles of optimal selection of concrete and steel classes for pipe concrete K-shaped assemblies have been established. This makes it possible to ensure the reliability of modern bridge lattice structures, increase their efficiency and cost-effectiveness.

*Keywords:* tubular concrete; lattice structures; bridge trusses; K-shaped assemblies; finite element method; nonlinear modeling; failure mode

## REFERENCES

1. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryn–tsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi Zminoiu No 1, 34 DBN V.1.2–14:2018.* (2022). (in Ukrainian)
2. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia, 218 DBN V.2.3–14:2006.* (2007). (in Ukrainian)
3. *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu No 1, 298 DBN V.2.6–198:2014.* (2022). (in Ukrainian)
4. *Konstruksii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia. Zi Zminoiu No 1, 73 DBN V.2.6–98:2009.* (2020). (in Ukrainian)
5. *Prokat konstruksiiinyi z nelehovanoi ta lehovanoi stali dlia mostobuduvannia. Tekhnichni umovy, 9 DSTU 8817:2018.* (2019). (in Ukrainian)
6. *Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernistykh stalei dlia konstruksii. Chastyna 2. Rozmiry, hranychni vidkhyly ta kharakterystyky, 34 DSTU EN 10219–2:2009.* (2009). (in Ukrainian)
7. *Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Chastyna 4–3. Truboprovody (EN 1993–4–3:2007, IDT), 77 DSTU–N B EN 1993–4–3:2012.* (2012). (in Ukrainian)
8. *Yevrokod 4. Proektuvannia stalezalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 2. Zahalni pravyla i pravyla dlia mostiv (EN 1994–2:2005, IDT). Proekt, 131 DSTU–N B EN 1994–2:2012.* (2012). (in Ukrainian)
9. Kolomiychuk, G. P., Maistrenko, O. F., Kolomiychuk, V. G., & Kolomiychuk, V. G. (2020). Construction solutions of modern large–span tube–concrete arch bridges. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 13, 42–48. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775–2410–6208–2020–3\(13\)–05](https://doi.org/10.36910/6775–2410–6208–2020–3(13)–05) (in Ukrainian)
10. Korostylov, L. I., Luhinin, O. Ye., Spikhtarenko, V. V., & Terlych, S. V. (2017). *Opir materialiv: navchalnyi posibnyk.* Mykolaiv : Vydavnytstvo NUK. (in Ukrainian)
11. Spivak, D. S., & Kliuchnyk, S. V. (2024). Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top. *Science and Transport Progress*, 1(105), 105–112. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301524> (in Ukrainian)
12. Aswathi Dev. K. K., Preetha Prabhakaran, & Neethu. S. (2015). Analytical Study on Fatigue Behaviour of Steel Truss Girder Joints. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(10), 574–578. (in English)
13. Chen, B.–C., & Wang, T.–L. (2009). Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 14(2), 70–80. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084–0680\(2009\)14:2\(70\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084–0680(2009)14:2(70)) (in English)

14. Ferrotto, M. F., Fenu, L., Xue, J.–Q., Briseghella, B., Chen, B.–C., & Cavaleri, L. (2022). Simplified equivalent finite element modelling of concrete–filled steel tubular K–joints with and without studs. *Engineering Structures*, 266, 114634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114634> (in English)
15. Huang, W., Fenu, L., Chen, B., & Briseghella, B. (2018). Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 241-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020> (in English)
16. Huang, W., Fenu, L., Chen, B., & Briseghella, B. (2015). Experimental study on K–joints of concrete–filled steel tubular truss structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 182-193. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.023> (in English)
17. Joseph, J. R., & Henderson, J. H. (2023). Concrete–filled steel tube truss girders—a state–of–the–art review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(49), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00220-w> (in English)
18. Structures with Prof. H. (2021). Concrete Microplane Model – FEA using ANSYS – Lesson 10. *YouTube*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=JXbZnhGZliY> (in English)
19. Tian, Z., Liu, Y., Jiang, L., Zhu, W., & Ma, Y. (2019). A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(1), 94-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001> (in English)
20. Wu, Y., Wang, X., Fan, Y., Shi, J., Luo, C., & Wang, X. (2024). A Study on the Ultimate Span of a Concrete–Filled Steel Tube Arch Bridge. *Buildings*, 14(4), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040896> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2024

Прийнята до друку: 19.03.2025

## ЗМІСТ

### **ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**

**М. М. БІЛЯЄВ, В. А. КОЗАЧИНА,  
М. В. КИРИЧЕНКО, М. О. СКУРАТОВ, А. О. ЧІРКОВ,  
Г. К. ФІЛОНЕНКО**  
Математичні моделі в задачах очищення води..... 5

**В. В. БІЛЯЄВА, С. А. ЩЕРБИНА**  
Експрес-модель для аналізу процесу нагрівання ґрунту  
в теплиці..... 14

**В. А. КОЗАЧИНА, М. М. БІЛЯЄВ, В. В. БІЛЯЄВА,  
П. В. СЕМЕНЕНКО, З. М. ЯКУБОВСЬКА**  
Математичне моделювання забруднення повітря біля  
ракети-носія на етапі передстартової підготовки..... 23

**В. М. КУЗНЕЦОВ, В. В. БІЛЯЄВА, О. В. БЕРЛОВ,  
О. В. ЗВОНАРЬОВА, П. Б. МАШИХІНА**  
Математичне моделювання забруднення повітря біля  
автодоріг та оцінювання ризику захворювань у людей, які  
перебувають у зоні впливу викидів від автомобілів..... 32

**П. Б. МАШИХІНА, М. М. БІЛЯЄВ,  
А. В. КАЛАШНИКОВ, В. В. ЦУРКАН, ЗАУР НАБІЄВ,  
Б. В. СЄРЄДІН**  
Швидкорозрахункові моделі в задачах  
водокористування..... 40

**О. О. МЕДВЕДЄВА, С. В. ДЗЮБА,  
І. В. КАЛАШНИКОВ, М. М. БІЛЯЄВ,  
В. А. КОЗАЧИНА**  
Оцінювання ефективності використання габонів для  
захисту від ураження промислових об'єктів..... 49

### **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ**

**О. Б. ГНИЛЕНКО, С. В. ПЛАКСІН**  
Дослідження впливу графенових контактів на  
ефективність фотоелектричного перетворення  
в багатоперехідному сонячному елементі  
з вертикальними р-п переходами..... 58

### **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ**

**М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА,  
Д. Л. КОВАЛЬСЬКИЙ**  
Перспективи впровадження високошвидкісного руху  
на залізницях України..... 65

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**О. А. СИРОТА, В. М. ГОРЯЧКІН**  
Проблеми рефакторингу програмного коду  
із застосуванням штучного інтелекту..... 77

**Н. Д. СТЕПАНОВА, Д. М. СНІСАРЧУК**  
Моделювання показників роботи рушникосушарки  
в низькотемпературній системі створення мікроклімату. 85

### **МАШИНОБУДУВАННЯ**

**В. М. БОГОМАЗ, В. Й. НАГАЧЕВСЬКИЙ**  
Дослідження впливу проєктних параметрів скребкового  
конвеєра з верхньою робочою гілкою на його технічні  
характеристики..... 93

### **РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**Є. С. РЯБОВ, Б. Х. ЄРІЦЯН, А. С. ТИХОНОВ,  
О. А. ХАЗОВ**  
Гібридна тягова система для вивізного локомотива  
промислових кар'єрних залізниць..... 104

**Л. В. УРСУЛЯК, О. О. БОЛОТОВ**  
Дослідження поздовжньої динаміки пасажирських поїздів  
для надання рекомендацій з керування ними на нових  
ділянках Азербайджанської залізниці..... 116

### **ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**

**В. К. МИРОНЕНКО, Я. О. ЗІОБРИК**  
Оцінка прогнозованого вантажопотоку інтер- /  
мультимодального транспортно-логістичного центру... 132

**В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. П. ІВАНОВА,  
Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ**  
Переробка свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів:  
виклики та перспективи..... 142

**Д. С. СПІВАК, С. В. КЛЮЧНИК**  
Вплив матеріалів і масштабного фактора на руйнування  
К-подібних вузлів трубобетонних мостів: ефективність  
конструктивних параметрів..... 152

# CONTENTS

## ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

**M. M. BILIAIEV, V. A. KOZACHYNA,  
M. V. KYRYCHENKO, M. O. SKURATOV,  
A. O. CHIRKOV, H. K. FILONENKO**  
Mathematical models for water treatment problems..... 5

**V. V. BILIAIEVA, S. A. SHCHERBYNA**  
Express Model for Analyzing the Process of Soil Heating  
in a Greenhouse..... 14

**V. A. KOZACHYNA, M. M. BILIAIEV,  
V. V. BILIAIEVA, P. V. SEMENENKO,  
Z. M. YAKUBOVSKA**  
Mathematical Modeling of Thermal Regime in the Launch  
Vehicle Fairing at the Stage of Prelaunch Preparation ..... 23

**V. M. KUZNETSOV, V. V. BILIAIEVA, O. V. BERLOV,  
O. V. ZVONAROVA, P. B. MASHYKHINA**  
Mathematical Modeling of Air Pollution Near Roads  
and Assessment of Disease Risk in People Exposed to Vehicle  
Emissions ..... 32

**P. B. MASHYKHINA, M. M. BILIAIEV,  
A. V. KALASHNYKOV, V. V. TSURKAN,  
ZAUR NABIIEV, B. V. SIERIEDIN**  
Fast Computational Models in Water Use Problems ..... 40

**O. O. MEDVEDIEVA, S. V. DZIUBA,  
I. V. KALASHNIKOV, M. M. BILIAIEV,  
V. A. KOZACHYNA**  
Evaluation of gabions usage effectiveness for industrial  
facilities protection against damage..... 49

## ***ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES***

**B. GNILENKO, S. V. PLAKSIN**  
Study of the Influence of Graphene Contacts on the Efficiency  
of Photovoltaic Conversion in a Multi-junction Solar Cell  
with Vertical p–n Junctions ..... 58

## ***RAILROAD AND ROADWAY NETWORK***

**M. B. KURHAN, D. M. KURHAN, N. P. KHMELEVSKA,  
D. L. KOVALSKYI**  
Prospects for the Implementation of High-Speed Railway  
in Ukraine..... 65

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING***

**O. A. SYROTA, V. M. HORIACHKIN**  
Problems of Program Code Refactoring with the Use  
of Artificial Intelligence ..... 77

**N. D. STEPANOVA, D. M. SNISARCHUK**  
Modeling the Performance of a Towel Dryer  
in a Low-Temperature Microclimate System ..... 85

## ***MECHANICAL ENGINEERING***

**V. M. BOGOMAZ, V. J. NAGACHEVSKYI**  
Research of the Influence of Design Parameters of a Scraper  
Conveyor with an Upper Working Branch on its Technical  
Characteristics ..... 93

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**IE. S. RIABOV, B. KH. YERITSIAN, A. S. TYKHONOV,  
O. A. KHAZOV**  
Hybrid Traction System for a Haulage Locomotive  
for Industrial Quarry Railways ..... 104

**L. V. URSULYAK, O. O. BOLOTOV**  
Study of the Longitudinal Dynamics of Passenger Trains  
to Provide Recommendations for Their Control on New  
Sections of the Azerbaijan Railways ..... 116

## ***TRANSPORT CONSTRUCTION***

**V. K. MYRONENKO, Y. O. ZIUBRYK**  
Estimation of the Forecasted Cargo Flow of an Inter-/  
multimodal Transport and Logistics Center..... 132

**V. YE. OLOSHEVSKA, H. P. IVANOVA,  
H. S. OLISHEVSKYI**  
Recycling Lead Acid Car Batteries: Challenges  
and Prospects ..... 142

**D. S. SPIVAK, S. V. KLIUCHNYK**  
Influence of Materials and Scale Factor on Failure  
of K-shaped Nodes of Pipe Concrete Bridges: Effectiveness  
of Design Parameters ..... 152

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

### Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),  
Український державний університет науки і технологій,  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,  
49010  
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.**

№ 1 (109) 2025

(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. 20,23. Тираж 100 пр. Зам. №02/01

**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. 1 (109) 2025

(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 20,23. Circulation 100. Order no. 02/01

**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

