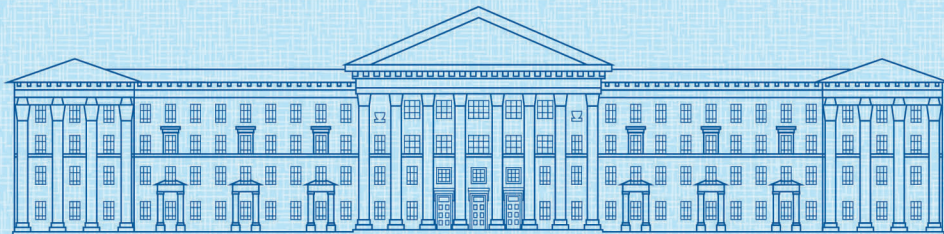




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 4(108)

•• 2024 ••

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 4 (108) 2024

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

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

Дніпро

2024

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пічуров С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляев М. М., УДУНТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакулєнко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головка Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., УДУНТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мурадян Л. А., УДУНТ (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютєкін 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 26.12.2024 р., протокол № 2

Видавець

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

Адреса засновника
та редакції

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

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровського інститута інженерів залізничного транспорту»;
1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

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

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

з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 4 (108) 2024

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

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

Dnipro

2024

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief
Deputy Chief Editor
Executive Editor

Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

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

Journal
was registered

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

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

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

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

Published according to the Academic Council decision of the University from 26.12.2024, Protocol no. 2

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

Address
of Founder

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

Edition is being published since 1936:

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

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

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

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

since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 331.42:[504.6:519.87]

M. M. BILIAIEV¹, V. V. BILIAIEVA², O. V. BERLOV^{3*}, V. A. KOZACHYNA⁴,
P. B. MASHYKHINA⁵

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

²Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 374 82 89, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

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

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

⁵Dep. of «Hydraulics and Water Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-3057-9204

Quick computing CFD model to predict chemical pollution in room

Purpose. The problem of accidental contamination of workspaces attracts special attention, since in the event of such extreme situations, intense chemical contamination of the air in work areas occurs. This poses a threat of toxic exposure to workers. When assessing the consequences of such situations, it is necessary to take into account the time factor, in particular, to quickly determine the creation of concentrations of chemically hazardous substances. In this regard, an urgent task is to develop effective mathematical models for rapid assessment of the consequences of extreme situations in the working areas of chemically hazardous facilities. The paper considers a CFD model for analyzing the process of chemical air pollution in a workspace during an accidental release of a chemically hazardous substance. The solution of the problem is based on the numerical integration of the fundamental equations of continuum mechanics. **Methodology.** To calculate the air velocity field in the working room during the operation of supply and exhaust ventilation, a mathematical model of the motion of an inviscid fluid was used. The equation of convective diffusion motion was used to calculate the concentration of a chemically hazardous substance in the workspace. The integration of the modeling equations was carried out using finite difference schemes. **Findings.** A dynamic model has been created to calculate the spread of a chemically hazardous substance in a workspace. On the basis of the built CFD model, a computer program was created to conduct a computational experiment. **Originality.** A CFD model has been created to predict the level of air pollution in a workspace in the event of toxic gas emissions. The model is based on the fundamental equations of aerodynamic mechanics and mass transfer. The model makes it possible to determine the effect of the ventilation mode, the intensity of emission of a chemically hazardous substance, the location of equipment in the workspace, and the dynamics of the formation of concentration fields. **Practical value.** The developed CFD model can be used to quickly analyze the consequences of accidental emissions of a chemically hazardous substance in a workplace and assess the risk of toxic exposure of workers.

Key words: chemical air pollution; workplace; mathematical modeling

Introduction

The problem of air pollution in working premises is particularly relevant. The range of practical tasks of this class includes tasks related to the

emission of toxic substances in extreme situations. In such situations, very rapid damage to personnel at workplaces is possible [1, 3–9]. This is due to the fact that in extreme situations, areas of intense chemical pollution appear very quickly in the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

premises (Fig. 1). Therefore, it is extremely important to reasonably determine the parameters of emergency ventilation, taking into account the fact that stagnant areas may form in working areas. Such forecasting can be performed on the basis of mathematical models [1, 2]. However, at present there is a shortage of such models, which makes the development of mathematical models for solving problems of this class urgent.



Fig. 1. Emission in the workplace (<http://surl.li/lrwqj>)

Purpose

Development of a numerical model for predicting emergency air pollution in the workplace.

Method

The calculation of the dynamics of chemical air pollution in a working room during an emergency release of chlorine is based on the numerical integration of aerodynamics and mass transfer equations. The modeling equation of aerodynamics is the following equation [1, 2]:

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

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

– at the boundary where the flow enters the calculation area (ventilation openings), the Neumann boundary condition is imposed on the velocity potential $\frac{\partial P}{\partial x} = U$, де U – known value of wind speed;

– at the boundary where the flow exits the computational domain (corresponding ventilation openings), a Dirichlet boundary condition is imposed on the velocity potential $P = P_0 + const$, where P_0 – some numerical constant;

– on the upper boundary, a solid impermeable wall, the condition of impermeability is imposed $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– on the lower boundary, a solid opaque wall, the condition of non-penetration is imposed $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– the condition of non-penetration will be fulfilled on all solid walls (equipment).

If the velocity potential fields are known, then the following dependencies are used to determine the components of the air flow velocity vector [2]:

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

Numerical integration of the modeling equation (1), as well as for numerical integration of other differential equations of the ventilation and mass transfer model, a rectangular difference grid is used. For numerical integration of the equation for the velocity potential, its writing in evolutionary form is used [2]:

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

where t – fictitious time, when $t \rightarrow \infty$ the solution of equation (2) approaches the solution of Laplace's equation (1).

In this case, numerical integration was carried out in two stages. The differential dependencies at each stage have the form:

– at the first stage:

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

– at the second stage:

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

Next, the values of the air flow velocity components were determined based on the dependencies.

After calculating the air flow velocity, the solution of the energy equation begins. We also use a difference splitting scheme for the solution.

The calculation is carried out until the condition is met.

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

where ε – small number; n – iteration number.

The process of spreading a hazardous substance that enters the air of a workroom during an emergency emission is modeled based on the mass transfer equation [1, 2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum q_i \delta(x - x_i)(y - y_i), \quad (5) \end{aligned}$$

where C – concentration of a chemically hazardous substance; u, v – components of the air flow velocity vector in the working space; w_s – rate of gravitational settling of matter; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – turbulent diffusion coefficients; q_i – emission intensity of a chemically hazardous impurity; $\delta(x - x_i)(y - y_i)$ – Dirac delta function; (x_i, y_i) – coordinates of the location of the emission source of a chemically hazardous impurity in the workplace; t – time.

For numerical integration of equation (5), the following transformations are made [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ u^+ &= (u + |u|)/2, \quad u^- = (u - |u|)/2, \\ v^+ &= (v + |v|)/2, \quad v^- = (v - |v|)/2, \end{aligned}$$

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

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

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \end{aligned}$$

Then, we can write an analogue of equation (1) in difference form:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + \\ + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + \\ + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \quad (6) \end{aligned}$$

The parameter δ_{ij} is 1 if there is a source of contamination in the differential cell, and 0 if there is no source of contamination in the cell.

Note that this entry uses the following dependency:

$$q_{i,j} = q_i / \Delta x / \Delta y,$$

where q_i – intensity of the pollutant emission source.

Next, equation (6) is decomposed as follows [2]:

– step 1 ($k=1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \quad (7) \end{aligned}$$

– step 2 ($k=n+1/2$; $c=n+1/4$):

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

– step 3 ($k=n+3/4$; $c=n+1/2$):

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

– step 4 ($k=n+1$; $c=n+3/4$):

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

A feature of the considered splitting scheme is that at each calculation step, the concentration of a chemically hazardous substance is determined by an explicit formula.

At the next stage, the software implementation of the constructed numerical models of aerodynamics and mass transfer was carried out.

Results

A computational experiment was conducted on the basis of the developed numerical models of aerodynamics and mass transfer. The scheme of the computational domain is shown in Fig. 2. In the working room, an emergency ammonia emission was considered. The emergency emission was carried out during 20s, and then the emission stopped. In the working room, air enters through an opening located at the middle of the left wall, and the outlet opening was situated at the right wall of the room. The both openings are shown by the «arrows» in Fig. 2.

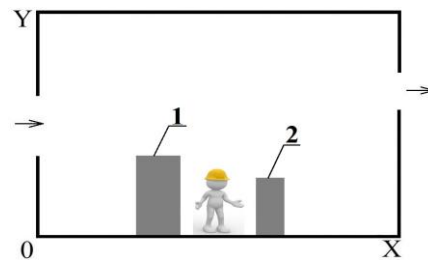


Fig. 2. Calculation scheme:
1 – ammonia emission site; 2 – equipment

The intensity of ammonia emission was 3 g/s, the dimensions of the calculation area were 10m*5m. When performing calculations, the following dependencies were used to determine the value of the diffusion coefficients:

$$\mu_x = 0,1 \cdot u; \quad \mu_y = 0,1 \cdot v.$$

The results of the numerical experiment are shown in two forms: a matrix of the distribution of ammonia concentration in the working room (Fig. 3–6) and in the form of ammonia concentration isolines (Fig. 7–10). The matrices make it possible to obtain quickly a «quantitative» assessment of the level of chemical air pollution in the working room, or in a certain area of the room, and change of this level during time. The modeling results, shown in the form of isolines (Fig. 3–6), make it possible to determine quickly the shape of the chemical pollution zone and the influence of the equipment on the «deformation» of the pollution zone.

The matrix figures show the ammonia concentration field in dimensionless form. Each number in the figure shows the concentration value as a percentage of C_{max} (maximum concentration).

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

The maximum ammonia concentration changes over time in the working room.

Figure 7–10 shows how the shape of the contamination zone in the workroom changes at different times after the accident. Figure 3–6 shows the ammonia concentration field in dimensionless form. Each number in the figure shows the concentration value as a percentage of its maximum value at a given time.

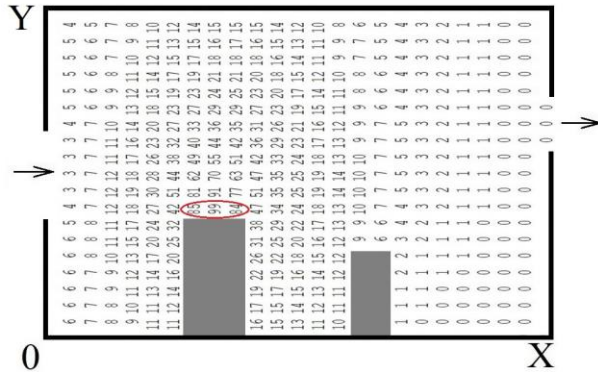


Fig. 3. Area of contamination in the workplace $t = 2s$, $C_{max} = 1,34 \text{ g/m}^3$

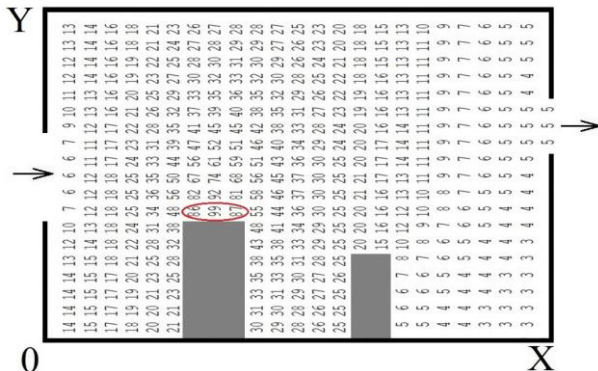


Fig. 4. Area of contamination in the workplace $t = 4s$, $C_{max} = 1,56 \text{ g/m}^3$

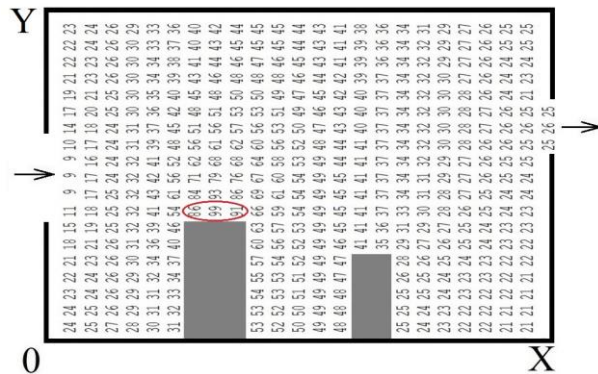


Fig. 5. Area of contamination in the workplace $t = 10s$, $C_{max} = 1,95 \text{ g/m}^3$



Fig. 6. Area of contamination in the workplace $t = 20s$, $C_{max} = 2,25 \text{ g/m}^3$

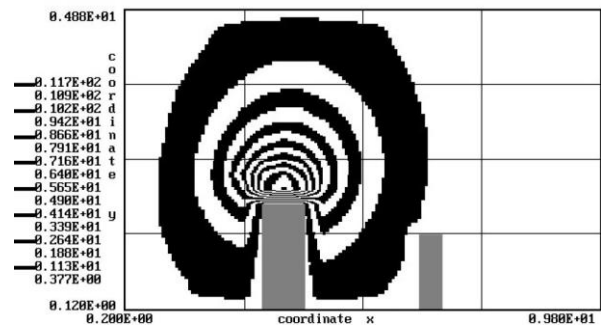


Fig. 7. Isolines of impurity concentration in the working room $t = 1s$

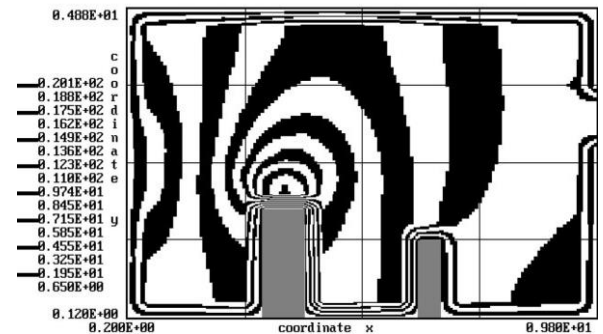


Fig. 8. Isolines of impurity concentration in the working room $t = 10s$

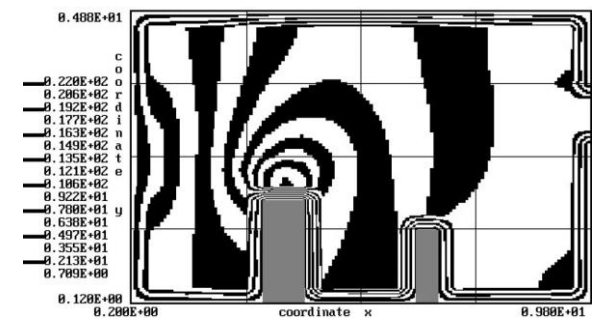


Fig. 9. Isolines of impurity concentration in the working room $t = 15s$

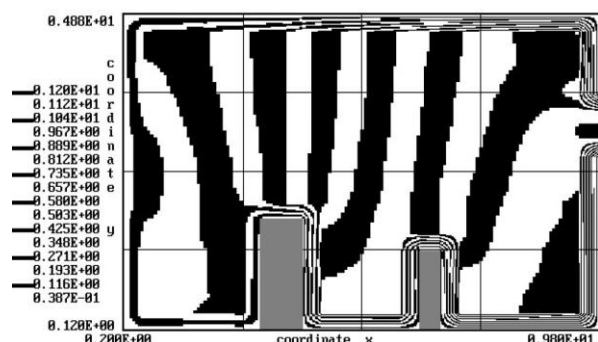


Fig. 10. Isolines of impurity concentration in the working room $t = 70s$

As can be seen from the figures, the contamination zone increased in size very quickly. By the time $t = 4s$, this zone «occupied» all the working room. That means that the room was filled with toxic gas. The concentration of toxic gas will significantly exceed the maximum permissible concentration. And this can be seen clearly in Fig. 11. Fig. 11 shows the change in the maximum ammonia concentration in the room at different times.

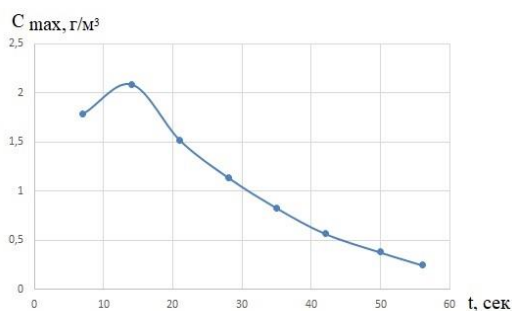


Fig. 11. Changing the maximum indoor ammonia concentration in room

As can be seen from Fig. 11, over time there is a decrease of ammonia concentration in room, which is associated with the leak of a chemically hazardous substance. An intensive decrease of the ammonia concentration is explained by the work of emergency ventilation system and emission source stop. The calculation time is 3 seconds.

Scientific novelty and practical significance

A numerical model has been created to predict the level of air pollution in a work environment due to toxic gas emissions.

The model is based on the numerical integration of fundamental equations of the mechanics of a solid medium. A feature of the numerical model is the consideration of the main physical factors that affect the spread of toxic gas in the room (the presence of equipment in the room, the position of ventilation openings, the location of the emission of the toxic substance, etc.) and the speed of calculation.

Conclusions

1. A dynamic multifactorial numerical model has been developed to analyze and predict the process of chemical contamination of the work space.

2. A feature of the numerical model is the ability to take into account the main physical factors that influence the formation of pollution areas in work areas.

3. The developed numerical model can be used to scientifically substantiate emergency ventilation parameters to quickly reduce the concentration of a toxic (or explosive) substance in a workroom.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Якубовская З. Н. *Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях*. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 123 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Jose R. S., Perez-Camanyo J. L. Modelling infiltration rate impacts on indoor air quality. *Elsiver, International Journal of Thermofluids*. Vol. 17. P. 100284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100284>
4. Kiosak V., Isaiev V., Fedorenko V., Gridasovhttps A. Modeling the entry of air contaminants into a room. *Mechanics and mathematical methods*. 2024. Vol. 6. Iss. 2. P. 58–76. DOI: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-58-76>
5. Li Y. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. 2012. Vol. 4. Iss. 12. P. 1352–1361. DOI: <https://doi.org/10.4236/health.2012.412197>

6. Lim E., Sandberg M., Ito K. Returning characteristics of pollutants for a local domain in the presence of re-turning and recirculating airflow in indoor environments. *Indoor Air*. 2021. Vol. 31. Iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12803>
7. Putri A. N. A. R., Salam R. A., Rachmawati L. M., Ramadhan A., Adiwidya A. S., Jalasena A., Chandra I. Spatial Modelling of Indoor Air Pollution Distribution at Home. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2243. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012072>
8. Shuguang H. *Experimental and numerical study on personalized ventilation coupled with displacement ventilation* : thesis. National University of Singapore, 2011. 140 p.
9. Zhang M., Zhao B. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. 2016. Vol. 51. P. 1–6.

М. М. БІЛЯЄВ¹, В. В. БІЛЯЄВА², О. В. БЕРЛОВ^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА⁴,
П. Б. МАШИХІНА⁵

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

²Каф. Енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 374 82 89, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{3*}Каф. Охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 247 16 01, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

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

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

Швидка обчислювальна CFD-модель для прогнозування хімічного забруднення приміщення

Мета. Проблема аварійного забруднення робочих приміщень привертає до себе особливу увагу, оскільки в разі виникнення таких екстремальних ситуацій відбувається інтенсивне хімічне забруднення повітря в робочих зонах. Це створює загрозу токсичного ураження працівників. Під час оцінювання наслідків таких ситуацій потрібно враховувати часовий фактор, зокрема швидко визначити створення концентрацій хімічно небезпечних речовин. У зв'язку з цим актуальною задачею є розробка ефективних математичних моделей для оперативного оцінювання наслідків екстремальних ситуацій у робочих приміщеннях хімічно небезпечних об'єктів. Розглянуто побудовану CFD-модель для аналізу процесу хімічного забруднення повітря в робочому приміщенні під час аварійної емісії хімічно небезпечної речовини. Рішення задачі базується на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. **Методика.** Для розрахунку поля швидкості повітря в робочому приміщенні під час роботи припливно-витяжної вентиляції використано математичну модель руху нев'язкої рідини. Для розрахунку концентрації хімічно небезпечної речовини в робочому приміщенні використано рівняння конвективно-дифузійного руху. Інтегрування модельованих рівнянь здійснено за допомогою скінченнорізницевої схем. **Результати.** Створено динамічну модель для розрахунку поширення хімічно небезпечної речовини в робочому приміщенні. На базі побудованої CFD-моделі створено комп'ютерну програму для проведення обчислювального експерименту. **Наукова новизна.** Створено CFD-модель для прогнозування рівня забруднення повітря в робочому приміщенні в разі емісії токсичного газу. Основою моделі є фундаментальні рівняння механіки аеродинаміки та масопереносу. Модель дає можливість визначати вплив режиму вентиляції, інтенсивності емісії хімічно небезпечної речовини, розташування обладнання в робочому приміщенні та динаміку формування концентраційних полів. **Практична значимість.** Розроблена CFD-модель може бути використана для оперативного аналізу наслідків аварійної емісії хімічно небезпечної речовини в робочому приміщенні та оцінювання ризику токсичного ураження працівників.

Ключові слова: хімічне забруднення повітря; робоче приміщення; математичне моделювання

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., & Yakubovska, Z. N. (2015). *Prognozirovaniye urovnya zagryazneniya vozduшной sredi v pomeshcheniyakh*. Dnepropetrovsk: «Aktsept PP». (in Russian)
2. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostra-neniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
3. Jose R. S., Perez-Camanyo J. L. Modelling infiltration rate impacts on indoor air quality. *Elsiver, International Journal of Thermofluids*. Vol. 17. P. 100284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100284>
4. Kiosak V., Isaiev V., Fedorenko V., Gridasovhttps A. Modeling the entry of air contaminants into a room. *Mechanics and mathematical methods*. 2024. Vol. 6. Iss. 2. P. 58–76. DOI: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-58-76>
5. Li Y. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. 2012. Vol. 4. Iss. 12. P. 1352–1361. DOI: <https://doi.org/10.4236/health.2012.412197>
6. Lim E., Sandberg M., Ito K. Returning characteristics of pollutants for a local domain in the presence of returning and recirculating airflow in indoor environments. *Indoor Air*. 2021. Vol. 31. Iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12803>
7. Putri A. N. A. R., Salam R. A., Rachmawati L. M., Ramadhan A., Adiwidya A. S., Jalsena A., Chandra I. Spatial Modelling of Indoor Air Pollution Distribution at Home. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2243. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012072>
8. Shuguang H. *Experimental and numerical study on personalized ventilation coupled with displacement ventilation* : thesis. National University of Singapore, 2011. 140 p.
9. Zhang M., Zhao B. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. 2016. Vol. 51. P. 1–6.

Надійшла до редколегії: 12.08.2024

Прийнята до друку: 10.12.2024

УДК 631.344.5:519.87

В. В. БІЛЯЄВА^{1*}, С. А. ЩЕРБИНА²

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

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

Математичне моделювання температурних полів у культивацийних спорудах

Мета. Основна мета статті полягає в розробці методу розрахунку теплових полів у ґрунті теплиць в разі його штучного обігріву. Оскільки температурний режим у ґрунті теплиць має істотний вплив на врожайність рослин, дуже важливо, з одного боку, забезпечити потрібну температуру в ґрунті, а з іншого – визначити енергоощадний режим обігріву. **Методика.** Для побудови методу використано чисельне інтегрування рівняння теплопереносу. Для аналізу та прогнозування нестационарного процесу нагрівання ґрунту в теплиці в разі його штучного обігріву використано двовимірне рівняння теплопереносу, а для його розв'язання – дві скінченнорізницьові схеми. На базі побудованих чисельних моделей розроблено комп'ютерну програму для проведення обчислювального експерименту. **Результати.** Створено ефективні комп'ютерні моделі для прогнозування нестационарного формування теплових зон у ґрунті теплиці під час її штучного обігрівання. Наведено результати чисельного моделювання. **Наукова новизна.** Розроблено прогностичні чисельні моделі для аналізу динаміки формування теплових полів у ґрунті теплиць під час його штучного нагрівання. На базі розроблених чисельних моделей створено комплекс прикладних програм для проведення обчислювального експерименту з визначення нестационарного поля температури в ґрунті теплиць. Побудовані чисельні моделі належать до класу «operational models», тобто розроблені для оперативного аналізу теплових полів у ґрунті. Для практичного використання розроблених чисельних моделей потрібна стандартна вхідна інформація. **Практична значимість.** Побудовані чисельні моделі становлять інструмент для аналізу динаміки нагрівання ґрунту та можуть бути використані піл час розробки енергоощадної технології обігріву. За допомогою цих моделей можна визначати час оптимального нагрівання ґрунту в різних зонах (коренева система, поверхня ґрунту) та визначати раціональне місце розташування нагрівальних елементів, час, коли потрібно вимкнути нагрівальні елементи, та час, коли їх потрібно ввімкнути знову. Тобто ці моделі дозволяють розробити енергоощадну технологію обігрівання ґрунту в теплиці.

Ключові слова: обігрів ґрунту; теплиця; енергозбереження; чисельне моделювання

Вступ

Для успішного вирощування рослин у культивацийних спорудах, особливо в холодну пору року, дуже важливо підтримувати стабільну температуру [2, 5–9]. Недостатнє тепло може призвести до уповільнення росту, зниження врожайності і навіть загибелі рослин. Правильно підібрана система обігріву дозволяє створити сприятливі умови для вирощування культур і мінімізувати енергетичні витрати. Існує декілька способів обігріву теплиць, які використовують залежно від розмірів споруди, кліматичних умов і особливостей вирощуваних культур. Розглянемо ці способи.

Пічне опалення. Це один із традиційних способів, коли для обігрівання теплиці використовують піч, а як паливо – дрова, вугілля, брикети (рис. 1).

Такий спосіб обігріву відзначається простою встановлення, особливо для невеликих теплиць, та незалежністю від зовнішніх джерел енергії. До того ж велике значення має доступність палива в деяких регіонах. До недоліків такого виду опалення слід віднести нерівномірний розподіл тепла: біля печі може бути занадто жарко, а в далеких куточках холодно. Такий спосіб потребує постійного контролю і регулярного додавання палива. Окрім того, існує небезпека пожежі в разі неправильної експлуатації.



Рис. 1. Пічне опалення в теплицях
(https://www.facebook.com/photo.php?fbid=176478976332848&id=158836721430407&set=a.164091977571548&locale=sk_SK)

Fig.1. Stove heating in greenhouses
(https://www.facebook.com/photo.php?fbid=176478976332848&id=158836721430407&set=a.164091977571548&locale=sk_SK)

Електричне опалення. Електричні обігрівачі, тепловентилятори або конвектори є популярними для обігріву теплиць, оскільки дозволяють точно контролювати температуру.



Рис. 2. Обігрів теплиць за допомогою тепловентиляторів
(<https://vts-volcano.com.ua>)

Fig. 2. Heating greenhouses with fan heaters
(<https://vts-volcano.com.ua>)

Використання електричних приладів для опалення теплиць вирізняється простотою: достатньо увімкнути прилад у розетку. Можливість точного контролю температури за допомогою термостатів та рівномірний розподіл тепла в теплиці також робить цей спосіб доволі популярним.

Попри це мають місце високі експлуатаційні витрати через вартість електроенергії, та залежність від електромережі: у випадку вимкнення електрики теплиця залишиться без тепла. Слід зауважити, що іноді ефективність використання електричного опалення є обмеженою через ве-

ликі розміри теплиць. У деяких випадках може знадобитися встановлення кількох обігрівачів.

Водяне опалення. У системах водяного опалення використовують котел і труби, по яких циркулює гаряча вода. Це забезпечує рівномірний обігрів теплиці по всій її площі. До додаткових переваг водяного опалення належать: можливість автоматизації та налаштування системи, економічність за умови правильного встановлення та використання обладнання.

До недоліків такого способу обігріву можна віднести: високі початкові витрати на встановлення, потребу в регулярному технічному обслуговуванні системи та залежність від джерела тепла – газ, електрика або тверде паливо.

Газове опалення. Газові котли або теплогенератори працюють на природному газі або пропані, що дозволяє ефективно обігрівати теплицю. Таке устаткування має високу потужність, що дозволяє швидко прогрівати повітря в теплиці, та дає змогу забезпечити автоматизацію процесу, що знижує необхідність постійного контролю. У регіонах із дешевим газом цей вид обігріву є доволі економічним.

Слід зауважити, що в разі використання газового опалення теплиць необхідно суворо дотримуватися заходів безпеки через ризик витоку або вибуху газу. За неправильного розташування обладнання може мати місце нерівномірний прогрів. Також залишається ймовірність залежності від постачання газу.

Інфрачервоне опалення. Інфрачервоні обігрівачі випромінюють тепло, яке безпосередньо поглинають поверхні рослин і ґрунту, нагріваючи їх.



Рис. 3. Інфрачервоне опалення культивування споруд
(<https://gaston.com.ua/blog/pro-otoplenie/>)

Fig. 3. Infrared heating of cultivation facilities
(<https://gaston.com.ua/blog/pro-otoplenie/>)

Інфрачервоне опалення є ефективним та економічним, оскільки енергія спрямована прямо на об'єкти. Цей спосіб вирізняється простотою встановлення обладнання і можливістю локалізованого обігріву. Додатковою перевагою є низьке споживання енергії порівняно з іншими електричними обігрівачами.

Водночас локальний характер обігріву можна віднести і до недоліків, отже нагріваються лише ті зони, на які спрямоване випромінювання. Тому виникає необхідність у точному розрахунку потужності і розташування приладів для рівномірного обігріву. Слід відзначити високі початкові витрати на якісні інфрачервоні обігрівачі.

Електрообігрів ґрунту теплиць. Цей метод передбачає встановлення нагрівальних кабелів під поверхнею ґрунту, що дозволяє рівномірно прогрівати ґрунт і, відповідно, кореневу систему рослин.

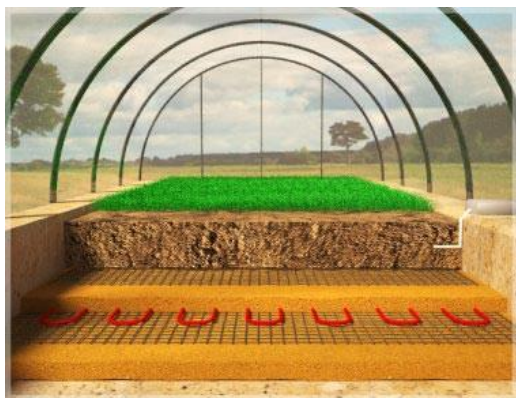


Рис. 4. Встановлення електричних кабелів під поверхню ґрунту
(<https://teplomontag.in.ua/ua>)

Fig. 4. Installation of electrical cables under the surface of the soil
(<https://teplomontag.in.ua/ua>)

Електрокабелі забезпечують рівномірне прогрівання ґрунту, що сприяє поліпшенню кореневого росту та скорочує час укорінення рослин. У цьому випадку важливо відзначити також фактор енергозбереження, оскільки тепло розповсюджується безпосередньо в ґрунті, мінімізуючи втрати тепла.

Електрообігрів не потребує великої кількості обладнання і дозволяє автоматизувати підтримання температурного режиму.

До недоліків обігріву теплиць за допомогою електричних кабелів слід віднести: високі витрати на встановлення, оскільки потрібна підготовка ґрунту і прокладання системи кабелів; обмежену сферу застосування (кабелі ефективні лише для обігрівання ґрунту, а не повітря в теплиці) та залежність від стабільного джерела електроенергії, що вимагає надійної електромережі.

Встановлення сучасних та ефективних систем обігріву культивацийних споруд не тільки сприяє підтриманню потрібної температури всередині, але й допомагає скоротити витрати на енергію. Наприклад, автоматизовані системи з термостатами дозволяють точно регулювати температуру, запобігаючи як перегріву, так і переохолодженню. Ізоляція теплиці та використання джерел тепла, що відповідають конкретному регіону і розміру теплиці, також важливі для мінімізації витрат.

Таким чином, вибір системи обігріву теплиці залежить від багатьох чинників: доступності ресурсів, розміру теплиці, кліматичних умов і бюджету. У кожному випадку важливо врахувати всі переваги та недоліки різних методів обігріву, щоб забезпечити рослинам комфортні умови та оптимізувати витрати.

Для наукового обґрунтування параметрів системи опалення теплиць необхідно розв'язати комплекс важливих задач. До особливо важливих задач належить проблема раціонального обігріву ґрунту в теплиці. Це пов'язано з тим, що коренева система рослин повинна перебувати в певному діапазоні температур. Підтримка цього діапазону температури дозволяє позитивно впливати на врожайність. З іншого боку, раціональний режим обігріву ґрунту в теплиці дозволяє знизити енерговитрати підприємства та собівартість продукції. Для обґрунтування режиму обігріву необхідно мати спеціальні математичні моделі і методи розрахунку. У зв'язку з цим важливим науковим завданням є розробка методів розрахунку багатфакторного процесу обігріву ґрунту для вибору енергоощадного режиму обігріву.

Мета

Робота спрямована на розробку методу розрахунку теплових полів у ґрунті теплиць для його штучного обігріву.

Методика

Для аналізу та прогнозування температурного режиму в ґрунті теплиці використовуємо рівняння теплопровідності [1, 4]:

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

де T – температура ґрунту; $a = (a_x, a_y)$ – коефіцієнти температуропровідності; x, y – декартові координати розташування нагрівальних елементів; t – час.

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

1. На сторонах розрахункової зони реалізуємо умову «теплоізоляованої» стінки.

2. У початковий момент часу беремо, що в розрахунковій зоні відома температура T_0 .

3. У різницевих комірках, де розташовані нагрівальні елементи, задаємо відому температуру T_s , яку підтримуємо постійною (гранична умова першого роду.)

Чисельна модель. Для чисельного інтегрування моделювального рівняння (1) використовуємо прямокутну різницеву сітку [1, 3]. Для завдання місця розташування нагрівальних елементів у ґрунті, де підтримують постійну температуру T_s , використовуємо маркери. Ці маркери дозволяють формувати будь-яку схему розташування цих елементів у дискретній моделі.

Чисельне інтегрування рівняння (1) здійснюємо за допомогою двох скінченнорізницевоїх схем. Перша різницєва схема – явна, що має такий вигляд [1]:

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

Друга скінченнорізницєва схема, яку використовують для чисельного інтегрування моделювального рівняння (1), – це різницєва схема сумарної апроксимації. Ця схема має вигляд двокрокового розщеплення :

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Невідоме значення температури на кожному кроці розщеплення визначаємо за явною формулою.

На базі розглянутих чисельних моделей зроблено комплекс прикладних програм «SOIL-T», мова програмування FORTRAN. До складу цього комплексу програм входять такі підпрограми типу SUBROUTINE:

ST1 – розрахунок поля температури в ґрунті за допомогою явної різницевої схеми;

ST2 – розрахунок поля температури в ґрунті на базі різницевої схеми сумарної апроксимації;

ST3 – реалізація граничних умов;

ST4 – друк поля температури в ґрунті.

Координацію роботи підпрограм здійснює основна програма MAIN. Початкові дані для проведення обчислювального експерименту формуються у файлі початкових даних TE.dat.

Результати

На першому етапі виконано верифікацію побудованих чисельних моделей. Для цього було розглянуто тестову задачу, що має аналітичний розв’язок, у такій постановці: є прямокутна зона, де початкова температура дорівнює $400 \text{ }^\circ\text{C}$; зона має розмір $20 \times 15 \text{ м}$; на межах зони ставимо умову: $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $a = 1$. Визначаємо температуру в точці $x = 1 \text{ м}$, $y = 1 \text{ м}$ для різних моментів часу.

Аналітичний розв’язок цієї задачі відомий та має вигляд (А. Д. Полянін та інші):

$$T = T_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right).$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Розрахунок температури на базі аналітичного розв’язку та розроблених чисельних моделей наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення температури

Table 1

Temperature values

Час	Аналітична модель	Перша чисельна модель	Друга чисельна модель
2 с	54,76 °С	55,20 °С	55,23 °С
4 с	29,16 °С	29,31 °С	29,34 °С
6 с	19,71 °С	20,23 °С	20,25 °С

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

На другому етапі було розв’язано модельну задачу з визначення поля температури в ґрунті теплиці.

Метою проведеного обчислювального експерименту була перевірка розроблених чисельних моделей на можливість визначення нестационарного температурного поля в ґрунті в разі дії декількох джерел емісії тепла та за наявності багатозв’язаної розрахункової зони. Відомо, що за таких умов чисельні моделі втрачають стійкість та не можуть бути використані для прогнозних розрахунків. Тому ставимо завдання перевірки працездатності побудованих чисельних моделей для розв’язку прикладних задач.

Розглянуто два сценарії. Перший сценарій: в однорідному ґрунті наявні два елементи, що підтримують постійну температуру 45 °С (рис. 5). Другий сценарій: у ґрунті додатково розташована теплоізолювана пластина, що впливає на формування температурного поля (багатозв’язана зона). Початкова температура ґрунту становить 20 °С.

Розрахункові параметри (безрозмірне значення) для проведення обчислювального експерименту такі: розміри зони $L_x = 1$, $L_y = 1,6$; $a = 0,02$; початок кореневої системи показано на рисунках нижче штриховою лінією.

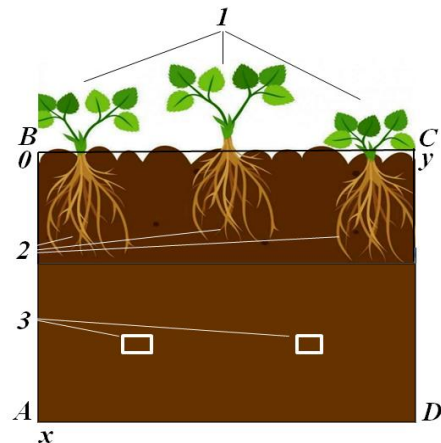


Рис. 5. Схема розрахункової області
1 – рослини; 2 – коренева система;
3 – нагрівальний елемент

Fig. 5. Scheme of the calculation area
1 – plants; 2 – root system; 3 – heating element

Результати обчислювального експерименту показано на рис. 6–10. Значення температури та час наведено в безрозмірному вигляді. Для визначення прогнозного значення температури в деякій точці ґрунту на основі даних, що наведені на рисунках, потрібно здійснити такий розрахунок:

$$T = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) * \frac{T_d}{99},$$

де T_{min} – мінімальна температура ґрунту в зоні дослідження ($T_{min} = 20$ °С); T_{max} – максимальна температура ґрунту в зоні дослідження ($T_{max} = 45$ °С); T_d – число, вказане в матриці розподілу температури; T – прогнозне значення температури ґрунту в точці.

Відзначимо, що значенню маркера «99» відповідає температура 45 °С, а значенню маркера «0» відповідає температура 20 °С.

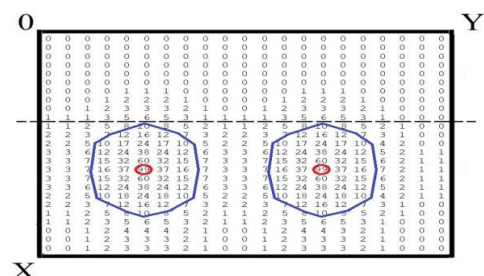


Рис. 6. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 1, $t = 0,39$

Fig. 6. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 1, $t = 0,39$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

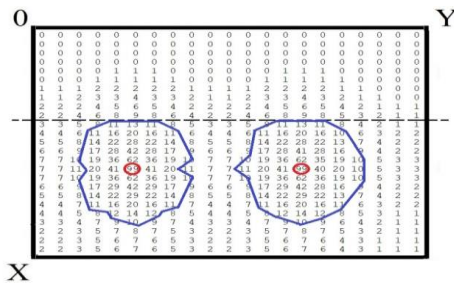


Рис. 7. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 1, $t = 0.59$

Fig. 7. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 1, $t = 0.59$

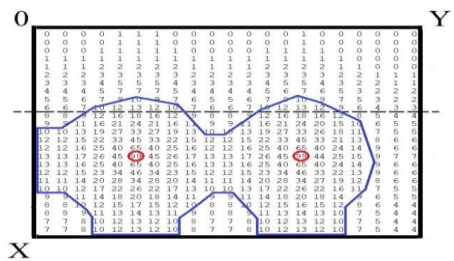


Рис. 8. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 1, $t = 0.99$

Fig. 8. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 1, $t = 0.99$

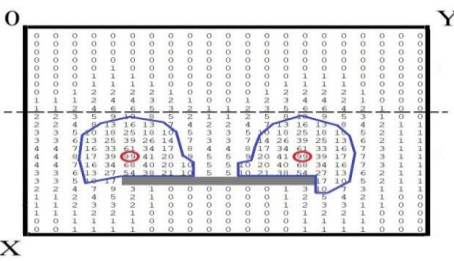


Рис. 9. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 2, $t = 0.39$

Fig. 9. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 2, $t = 0.39$

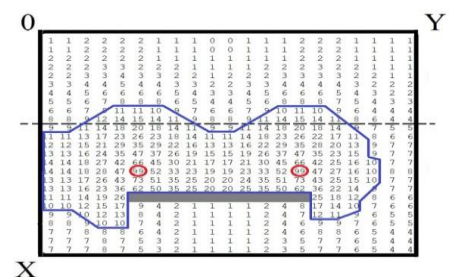


Рис. 10. Безрозмірне значення поля температури, сценарій № 2, $t = 0.99$

Fig. 10. Dimensionless value of the temperature field, scenario No. 2, $t = 0.99$

Аналіз результатів моделювання показує, що на початку процесу нагрівання ґрунту зона прогріву має форму кола з центром, що відповідає розташуванню нагрівальних елементів. Із часом має місце процес «з'єднання» цих зон. На момент часу $t = 0.39$ «теплова хвиля» від нагрівальних елементів досягає кореневої системи та починає рух у бік поверхні ґрунту в теплиці. Із рис. 9 і 10 можна бачити, що побудовані чисельні моделі дозволяють прогнозувати вплив додаткових конструктивних елементів у ґрунті на формування теплових зон. Час розрахунку кожного варіанту задачі – 4 с.

Таким чином, розроблені чисельні моделі являють собою інструмент для аналізу динаміки нагрівання ґрунту, що можуть бути використані для розробки енергоощадної технології обігріву. Ці моделі дають змогу визначати час оптимального нагрівання ґрунту в різних зонах (коренева система, поверхня ґрунту), визначати раціональне місце розташування нагрівальних елементів, час, коли потрібно вимкнути нагрівальні елементи, та час, коли їх потрібно ввімкнути знову. Тобто ці моделі дозволяють розробити енергоощадну технологію обігріву ґрунту в теплиці.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено прогностичні чисельні моделі для аналізу динаміки формування теплових полів у ґрунті теплиць у разі його штучного обігрівання.

На базі розроблених чисельних моделей створено комплекс прикладних програм для проведення обчислювального експерименту з визначення нестационарного поля температури в ґрунті теплиць.

Побудовані чисельні моделі належать до класу «operational models», тобто розроблені для оперативного аналізу теплових полів у ґрунті. Для практичного використання цих моделей потрібна стандартна вхідна інформація.

Висновки

1. Виконано аналіз наявних систем опалення теплиць.
2. Розроблено дві чисельні моделі для аналізу та прогнозування теплових полів у ґрунті у випадку використання системи опалення ґрунту.

3. Створено комплекс прикладних програм, що дозволяють визначати динаміку формування теплових полів у ґрунті під час його нагрівання.

4. Здійснено верифікацію розроблених чисельних моделей, що підтвердило їх адекватність.

5. Результати обчислювального експерименту показують, що розроблені чисельні моделі дають можливість отримати важливу прогностичну інформацію, яка необхідна для аналізу формування теплових полів у ґрунті під час його штучного обігрівання.

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. 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, Ч. 2. С. 40–51.
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. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *Transport Means 2022 : Proceedings of 26th International Scientific Conference* (Kaunas, 05–07 Oct. 2022). Kaunas, 2022. Pt. I. P. 122–127.
5. 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. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788>
6. Faniyi B., Luo Z. A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708>
7. 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>
8. 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>
9. Wang J., Lee W. F., Ling P. P. Ling Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation, *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653>

V. V. BILIAIEVA^{1*}, S. A. SHCHERBYNA²

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

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

Mathematical Modeling of Temperature Fields in Cultivation Structures

Purpose. The main purpose of the article is to develop a method for calculating thermal fields in greenhouse soil in the case of its artificial heating. Since the temperature regime in greenhouse soil has a significant impact on plant yields, it is very important, on the one hand, to ensure the required temperature in the soil, and on the other hand, to determine the energy-saving heating regime. **Methodology.** The method is based on the numerical integration of the heat transfer equation. A two-dimensional heat transfer equation was used to analyze and predict the unsteady process of soil heating in a greenhouse under artificial heating, and two finite-difference schemes were used to solve it. On the basis of the constructed numerical models, a computer program was developed to conduct a computational experiment. **Findings.** Effective computer models have been created to predict the unsteady formation of thermal zones in the greenhouse soil during its artificial heating. The results of numerical modeling are presented. **Originality.** Prognostic numerical models have been developed to analyze the dynamics of thermal fields formation in greenhouse soil during its artificial heating. On the basis of the developed numerical models, a set of application programs was created to conduct a computational experiment to determine the unsteady temperature field in green-

house soil. The constructed numerical models belong to the class of «operational models», i.e., they are designed for the operational analysis of thermal fields in the soil. For the practical use of the developed numerical models, standard input information is required. **Practical value.** The constructed numerical models are a tool for analyzing the dynamics of soil heating and can be used in the development of energy-saving heating technology. These models can be used to determine the time of optimal soil heating in different zones (root system, soil surface) and to determine the rational location of heating elements, the time when the heating elements should be turned off, and the time when they should be turned on again. These models allow us to develop an energy-saving technology for heating the soil in a greenhouse.

Key words: soil heating; greenhouse; energy saving; numerical modeling

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannia v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochychk mistsiakh*: monografiya. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Vikhrova, L. H., Kalich, V. M., & Prokopenko, T. O. (2011). A mathematical and computer design of distributing of temperatures in a hothouse. *Collection of Scientific Works of the Kirovohrad National Technical University. Series: Engineering in agricultural production, industrial engineering, automation, 24(2)*, 40-51. (in Ukrainian)
3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniia v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. 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. In *Transport Means 2022: Proceedings of 26th International Scientific Conference* (pp. 122-127). Kaunas, Lithuania. (in English)
5. 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*, 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196788> (in English)
6. Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies, 16*, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062708> (in English)
7. Katzin, D., Marcellis, 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)
8. 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)
9. Wang, J., Lee, W. F., & Ling, P. P. (2020). Estimation of Thermal Diffusivity for Greenhouse Soil Temperature Simulation. *Applied Sciences, 10*, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020653> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.08.2024

Прийнята до друку: 13.12.2024

UDC 551.432:550.835.2(536.4)V. Y. ULYANOV^{1*}, V. V. BILYK^{2*}

^{1*}Dep. «Engineering Geology and Geotechnics», Ukrainian State University of Science and Technologies, 24-a, Architect Oleh Petrov St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail uluanovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408

^{2*}Laboratory of Research of Nuclear and Thermal Power Plants, Ukrainian State University of Science and Technologies, 24-a, Architect Oleh Petrov St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail kolemasakar@gmail.com, ORCID 0000-0002-4435-2388

On the Issue of the Radon Activity of Tectonic Faults on the Qatar Peninsula

Purpose. The paper aims at providing the modern evaluation of radon activity in identified tectonic faults of the earth's crust based on archival data of radon measurements in groundwater which previously have been performed in the northern and eastern parts of the Qatar Peninsula. **Methodology.** The paper presents an additional extended justification for the application of an innovative technique for these conditions to identify the activity rate of tectonic faults in the rock foundation under the geological conditions of the Qatar Peninsula based on third-party measurements of radon in groundwater and using own universal Evaluation scale. **Findings.** A modern analysis of previously obtained results of radon measurements in groundwater of the Qatar Peninsula allowed us to suggest the orientation of tectonic fault directions in its northern and eastern parts and to additionally reveal the rate of their radon activity within the peninsula with a preliminary magnitude evaluation of displacement along the faults. A similar assumption was also proposed in the western part of the UAE adjacent to the peninsula, where the Barakah Nuclear Power Plant (BNPP) is located. This assumption is based on a certain similarity in the geological and tectonic conditions of the region. **Originality.** For the first time, the authors proposed the location of tectonic faults within the northern and eastern parts of the Qatar Peninsula according to radonometry performed for other purposes. We estimated their radon activity and the magnitude of movement along the faults. This implies increased safety during the construction and operation of various facilities, including a high degree of responsibility, particularly pipeline systems and transport communications that are important for the country's economy. **Practical value.** This technique can also be used in seismic monitoring for construction sites and in adjacent territories of other countries where similar explorations have not been conducted before.

Keywords: Qatar; radonometry; wells; radon measurements; tectonic faults

Introduction

The special properties of radioactive radon gas served as the basis for its use as one of the available indicators in establishing the activity rate of tectonic fault zones. Monitoring the stress state of the subsurface resources in such zones is necessary since various deformations of the earth's surface are observed near such zones. These processes lead to violations of the planned-high-altitude position and integrity of residential and public buildings, transport infrastructure facilities as well as structures of especially important energy facilities, such as nuclear power plants (NPP) [1]. In the numerous field studies during the 70–80s of the last century, a direct connection was established between the intensity of radon anomalies and geodynamic processes in tectonic fault zones. This phenomenon was the basis for organizing a fundamentally new direction of applied research in the field of engineering geology – structural-geodynamic mapping.

The peculiarities of radon (²²²Rn) behavior in geological space have created conditions for continuous radon monitoring as one of the indicators of possible seismic events, for example, abnormally high or abnormally low concentrations of gas in periods preceding earthquakes. The importance of radon monitoring for earthquake forecast purposes has been repeatedly confirmed in practice including the infamous events in the Italian L'Aquila (Abruzzo) that occurred in April 2009. These events were predicted several months before by local seismologist Giampaolo Giuliani based on observations of variations in soil radon.

Despite numerous facts of fairly successful application of this method, radon as a possible indicator of changes in the stress state of the subsurface resources has so far received undeservedly very little attention. This especially concerned measurements of radon concentration in groundwater. However, in recent years, soil radon measurements for geodynamic research have already been consolidated in regulatory documents of several countries,

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

albeit with few reservations. The technique of measuring radon in groundwater for geodynamics and earthquake forecast has yet to prove its value, although individual research in this field has been conducted [4, 7, 8, 9, 13, 14, 18, 19, 21, 22].

Purpose

The objective of this article is a modern evaluation of the radon activity in identified tectonic faults of the earth's crust based on open-source data of radon measurements in groundwater. These researches were previously carried out in the northern and eastern parts of the Qatar Peninsula by local research organizations. As well as justification for the application of the method for identifying the activity rate of tectonic faults in the specified area based on our own universal numerical scale.

Methodology

The Qatar Peninsula and the Gulf coastal areas have been studied in considerable detail for oil and gas exploration by various local and foreign organizations. Numerous large-scale geological, geotechnical, and geo-ecological explorations have been

conducted both on land and in the waters. As a result, the geological structure of the peninsula has been studied quite fully and described in many works available for wide review and study [6, 10, 15, 17]. In particular, geological maps of the peninsula are shown in Fig. 1 and 2.

However, the authors could not find a sufficiently detailed tectonic map of the peninsula with the exact location of tectonic fault zones. Nevertheless, their presence in the northern part of the study area is beyond doubt and is confirmed by works [2, 11]. Indirect data can help clarify this situation, in particular, the results of radon measurements in groundwater at the specified territory.

Explorations to determine radon in groundwater on the peninsula and in the adjacent territory were carried out, but exclusively for environmental purposes [3, 12]. The last of the above-mentioned scientific articles is the most interesting in its results for this work. The explorations were carried out at a fairly high level, and the same is true for the equipment used. The following materials were taken from this article for study and analysis: Fig. 3, 4, and Table 1.

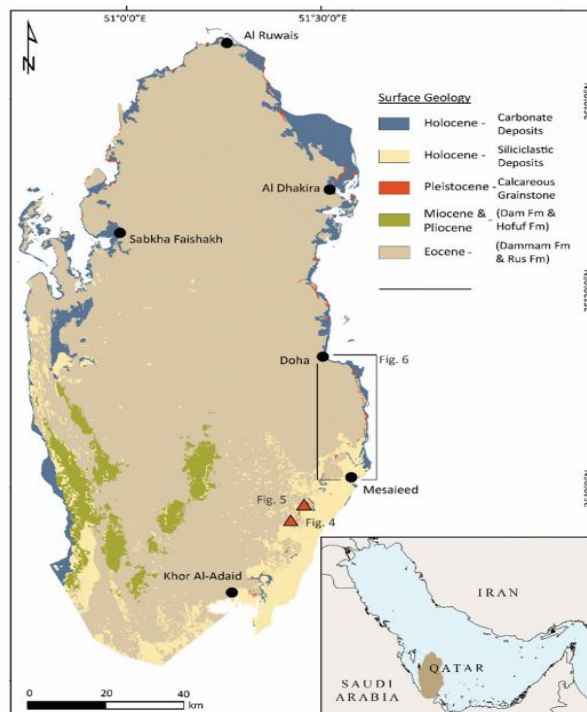


Fig. 1. The surficial geological map of Qatar after Cavelier et al. (1970) and Seltrust Engineering Ltd (1980) showing various localities discussed in the text. Inset: Location map showing Qatar in the context of the Arabian Gulf area (imagery data: ESRI 2005 ArcWorld Supplement). J.M. Rivers et al (2021)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

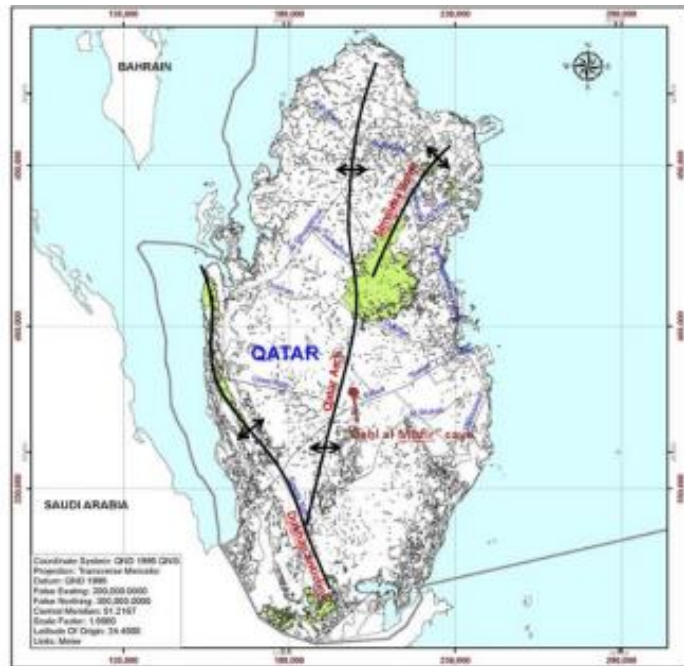


Fig. 2. Occurrences of the Rus Formation at the surface of Qatar in relation to the main structural features of the country (Qatar Arch, Simsima Dome and Dukhan Anticline). Jacques LeBlanc (2021)

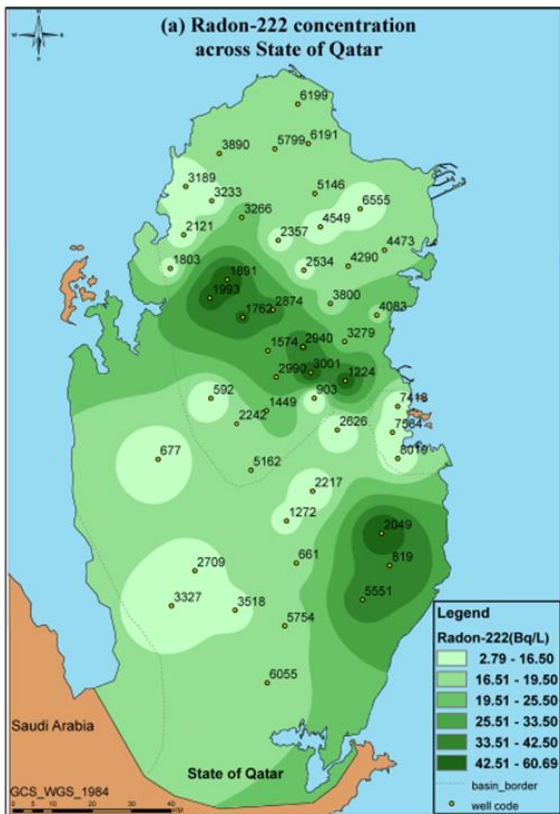


Fig. 3. The well location diagram and color gradation of zones based on radon content in groundwater. Manawi, Y. et al (2023)

Table 1

Results of radon measurements in wells on the peninsula. Manawi, Y. et al (2023)

Well Code	Radon Bq/L	Well Code	Radon Bq/L
592	5.57±0.64	3001	55.50±1.40
661	16.50±0.22	3189	7.550±1.720
677	5.16±0.69	3233	11.00±1.710
819	41.90±02.81	3266	21.200±2.070
903	2.71±0.20	3279	20.900±0.907
1224	52.40±2.63	3327	8.550±0.217
1272	12.40±1.50	3518	12.600±0.422
1574	28.90±0.925	3800	14.500±1.120
1762	45.30±1.32	3890	16.100±0.970
1803	11.900±0.948	4083	18.300±1.880
1891	58.800±2.760	4290	17.400±1.790
1993	49.400±4.010	4473	18.500±1.100
2049	60.700±13.400	4549	9.00±0.441
2121	9.870±0.889	5146	17.700±2.540
2217	6.900±0.764	5162	15.600±1.560
2242	14.400±1.380	5551	39.100±3.220

Continuation of Table 1

Results of radon measurements in wells on the peninsula. Manawi, Y. et al (2023)

Well Code	Radon Bq/L	Well Code	Radon Bq/L
2357	10.500±0.63	5754	15.300±1.910
2534	11.00±2.370	5799	14.500±1.250
2537	10.50±2.370	6055	15.600±0.485
2626	4.870±0.623	6191	18.900±1.040
2709	10.800±1.110	6199	17.200±1.840
2874	37.200±2.860	6555	7.500±0.665
2940	44.00±2.240	7418	8.590±0.999
2990	27.20±1.40	8019	11.100±1.030

The country's territory is traditionally classified as an aseismic region, but seismic events still occur. In particular, on 16/03/2022, an earthquake with a magnitude of 3.2 and a focal depth of 10 km was recorded in the Musay'id, Al Wakrah region. And on 27/05/2005, a seismic event with a magnitude of 3.2 was recorded in the southwest of the country, on the border with Saudi Arabia. Episodic seismic events were also recorded in the water area, including near Bahrain with a magnitude of 3.0–3.2. All of the above indicates the presence of a certain seismic potential in this territory. However, its nature still needs to be clarified.

Findings

When analyzing the factual material, especially maps, and diagrams, attention is drawn to the close-to-linear arrangement of anomalous zones with radon content in groundwater. This cannot be explained by geological boundaries between layers or other (geochemical) reasons. According to this work such a pattern of anomalies can only be a consequence of presence the tectonic fault zones, moreover, it's activity isn't clear. Also noteworthy is the large amplitude of the measured values of radon volume activity in the selected 48 wells, recorded in the range from 2.71 to 60.70 Bq/l.

Based on the analysis of research data, tectonic fault lines were assumed within the peninsula (Fig. 4). Their location is in good agreement with the fault zones mentioned in the works of Abu-Zeid Mohamed M. (1991) and Jacques LeBlanc (2021).

It is possible to confirm a more precise location of fault zones throughout the entire area of the peninsula only with additional large-scale profile (radon) explorations.

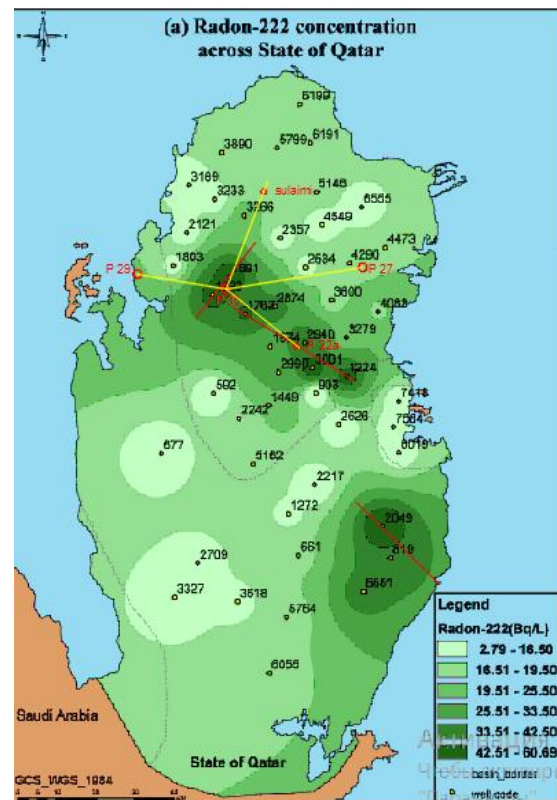


Fig. 4. Profiles through marker wells and lines of possible strikes of tectonic fault zones on the peninsula (highlighted in red). Manawi, Y. et al (2023)

It should be especially noted that the fault zone in the area of wells 2049, 819, and 5551, assumed by radon measurements, is completely absent on the E–W section shown in Fig. 2, 3 in the article by John M. Rivers et al. [15]. This indirectly indicates the wide additional capabilities of the technique.

The authors assessed radon activity in the identified tectonic faults within the Qatar Peninsula using the conducted explorations with using their own methodology, which is given in References to this article. This methodology is a radically revised and expanded earlier idea (Seminsky et al.), initially based only on soil radon measurements. The fundamental difference of the new methodology first introduced in the form of a universal scale, is the possibility of applying it to soil radon and radon in groundwater. And in the latest version of the methodology – with the possibility of evaluating the linear activity of the fault zones themselves. However,

the results of radon measurements on the Qatar Peninsula, show a significant spread of values. In relation to these results for calculating the activity of the faults the authors do not use the ratio of max/min measurements for the selected profiles. Instead, it

should be used average indicator of the radon measurement results on the wings of the fault zones. These wings are within the proposed profiles between the selected most representative wells with maximum contrast (Table 2).

Table 2

Summary Table of radon activity of tectonic faults on the Qatar Peninsula with the evaluation of possible displacements along faults

Item No.	Measurement results on selected profiles						Average value VAR, Bq/l	KQ	Radon activity level of radon according to KQ	Possible velocity of displacement along faults, mm/year
	Left-wing of the fault		Fault zone		Right-wing of the fault					
	Well No.	VAR, Bq/l	Well No.	VAR, Bq/l	Well No.	VAR, Bq/l				
1	2626	4.87	1224	52.4	4083	18.3	11.59	4.52	medium-active	1–2
2	903	2.71	1224	52.4	7418	8.59	5.65	9.27	active	2–5
3	592	5.57	3001	55.5	3279	20.9	13.23	4.2	medium-active	1–2
4	2242	14.4	3001	55.5	4083	18.3	16.4	3.38	medium-active	1–2
5	592	5.57	2940	44.0	3800	14.5	10.0	4.4	medium-active	1–2
6	592	5.57	1762	45.3	2534	11.0	8.28	5.47	active	2–5
7	592	5.57	1993	49.4	3233	11.0	8.28	6.0	active	2–5
8	1803	11.9	1891	55.8	2357	10.5	10.3	5.41	active	2–5
9	2217	6.9	2049	60.7	8019	11.0	9.0	6.72	active	2–5
10	5551	39.1	2049	60.7	8019	11.0	25.1	2.42	low-active	0–1
11	661	16.5	2049	60.7	8019	11.0	13.8	4.4	medium-active	1–2

Note: VAR – the volumetric activity of radon (VAR)

If we evaluate such an important element of tectonic activity as the nature of the displacements themselves in practical terms of the assumed fault zones and all other things being equal then large values of the KQ index are characteristic of faults and shears compared to upthrusts and thrusts. Although a direct connection between the nature of displacements or the contrast of the near-fault radon anomaly is naturally complicated by the influence of other components of tectonic activity.

The obtained values generally agree well with the developed universal scale. Processing the available data using the universal scale has already allowed us to assess the obtained results and evaluate the radon activity of the assumed fault zones from today's standpoint, suggesting their own interpretation. It should be especially noted that the given sample values (for a total of 48 wells) are too few

and for this reason cannot reflect the entire picture on the peninsula. However, an unexpectedly significant spread in the values of the volumetric radon activity in water along several profiles already makes us evaluate the stress state of the soil mass differently than it was previously thought. It is quite difficult to evaluate the seismotectonic situation using other scale indicators due to the lack of public available data on soil radon measurements on the Qatar Peninsula. However, the values obtained during the exploration and their significant differences within a small area already allow us to raise the issue of continuing the work. It is worth highlighting that one of the radon anomalies in the southeast of the peninsula coincides with the area where an earthquake with $M = 3.2$ was recorded on 16/03/2022. This is unlikely to be accidental and indicates the presence of some tectonic activity in the

area of the assumed fault, which requires further study.

In addition to the geological and structural-tectonic components, the study of radon emission from the earth's interior also has a clearly expressed technical aspect. This may fully apply to the project in creating the «Qatar Rail Long Distance» railway network, which will consist of 4 stages with completion by 2030.

Also, a relatively little-studied field is the possible impact of the identified geodynamic structures on welded pipeline seams for various purposes, especially high-pressure oil and gas pipelines. In the specified territory, these may well include the Ras Laffan-Umm Said, Ras Laffan-Mesaieed, and others. This is especially important for Qatar's energy sector. According to many researchers (Selyukov N. I., Ryaboshtan Yu. S. and others), the negative impact of such structures may be reduced to three main factors, namely:

- mechanical-dynamic factor, associated with local fluctuations of the daytime surface of the soil massif;

- gas-chemical factor, associated with an increased release of corrosive gases from fault zones of active geodynamic structures;

- radiation factor.

The latter is the least studied due to the specific effects of alpha particles formed as a result of radon decay in places of its intensive release from the subsurface resources on the corrosive environment, and, above all, on the water of the groundwater aquifer (the so-called radiolysis effect). Hydrogen peroxide, ozone with OH and H₂O₂ radicals formed during water radiolysis are energetic cathodic depolarizers. For the same reason, the radiolysis effect enhances the cathodic process, and, consequently, the corrosion itself, including the metal of pipeline welds when they intersect such structures.

For a high-quality analysis of the current geodynamic situation on the peninsula, the following types of work should be additionally included in the list of possible specialized (read – geophysical) explorations, namely: measuring radon in groundwater in all accessible hydrogeological wells. As well as measuring soil radon in boreholes near the wells being tested. If possible, work should also be carried out on the coastal part of the Gulf. Moreover, sampling is necessary both from the near-bottom layer of seawater and from the layer of bottom sediments at a depth of at least 1 m from the seabed level. The

profiles in the aquatic area should be located transverse to the fault zones identified by seismic exploration or assumed based on radon data.

In the future, such explorations may become an integral part of subsurface resource monitoring, including monitoring of modern tectonic movements of the earth's crust. Refusal to conduct such explorations is fraught with the manifestation of negative geotechnical processes and phenomena soon, which may complicate the operation of pipeline systems and other significant facilities that are critical for the state economy. If the proposed additional explorations confirm the detection of active segments of geodynamic structures associated with radon anomalies in certain areas of the peninsula (and, if it is sufficiently justified, near it, including in the territory of neighboring countries), the issue of the advisability of timely adoption of additional technical measures should be considered.

The relative proximity of the exploration area to the western part of the UAE does not exclude the presence of similar geodynamic processes with similar activity there. A certain similarity of their regional geological and possibly tectonic features could be considered. This raises the question of a similar analysis of soil radon and groundwater radon measurements in the western part of the UAE if such took place there. This is unlikely, because of a very small number of monitoring wells given in this part of the country, in contrast to the eastern and, partly, southern ones [20]. This is the more relevant since the largest operating four-unit Barakah NPP in the region is located in this part of the country. If radon explorations for seismotectonic purposes at the Barakah NPP site were not carried out during engineering surveys and subsequent monitoring, this would serve as an additional argument in favor of their immediate implementation. As follows from the International Atomic Energy Agency (IAEA) documents published as early as 2024, the trend toward tightening NPP safety requirements is only gaining strength. The explorations can also be combined with planned works to clarify the engineering and geological conditions for specific NPP buildings and structures. If active segments of geodynamic structures associated with radon anomalies are discovered (during the proposed additional explorations at the NPP site and adjacent territory – for example, to choose a radioactive wastes landfill after the NPP is liquidated), the advisability of taking timely technical measures should be considered.

Such explorations may further become an integral part of subsoil monitoring at the NPP site based on radon measurements. The assumed additional explorations will be able to ensure more complete seismic protection of the operating NPP units. And, as a consequence, accident-free operation of the completed NPP buildings and structures in the long term. These explorations may be especially significant in connection with plans to build a second NPP in the UAE [5]. One of the sites is considered to be the area of the first Barakah NPP, but even closer to the borders of Qatar and Saudi Arabia. That is region adjacent directly to the exploration area described in this article.

Originality and practical value

The analysis of the conducted measurements for the volumetric activity of radon in groundwater in the northern and eastern parts of the Qatar Peninsula, although carried out for other (environmental) purposes, confirmed the fundamental possibility of determining the location of both the fault zones themselves and their tectonic activity based on testing the upper (ground) aquifer. The latter even taking into account its openness and susceptibility to the influence of various man-made factors. Along with determining the activity of the identified fault zones, it became possible to indirectly evaluate the nature of the movement of crustal blocks in this territory. And in the future – the intensity of such movements.

It should be noted that in all the specified highly specialized explorations of radon activity of the identified tectonic faults were carried out on the peninsula for the first time. The authors have no information on such explorations in the country and abroad, in particular, in the UAE, Saudi Arabia, Bahrain, Oman, and Iran.

With further improvement of this method, it is possible to use it in seismically active areas, as well as in territories of neighboring countries adjacent to the peninsula, especially if they have facilities that are important for the economy and security, in particular, nuclear power plants, important pipelines, and railways.

Conclusion

Processing of available data using our own universal scale allowed us to give a new evaluation of previously obtained results and determine the radon activity of the identified fault zones.

In addition to determining the activity of the identified fault zones, it became possible to evaluate the intensity of movement of crustal blocks in this area. However, high-precision geodesy methods using space technologies need to confirm the obtained preliminary data. Nevertheless, their importance for all kinds of transport communications of the state is beyond doubt.

For a high-quality analysis of the current geodynamic situation, explorations in this area should be continued. The list of possible specialized (read – geophysical) explorations should additionally include the following types of work, namely: measuring radon in groundwater by the maximum number of available wells for water supply; and measuring soil radon near the wells being tested. With sufficient justification, the work can also be carried out on the coastal part of the water area. But, this will require the use of special equipment and technology.

The relative proximity of the exploration area to the western part of the UAE does not exclude the presence of similar geodynamic processes with similar activity there, considering a certain similarity of their regional geological, and possibly tectonic features. This, in turn, raises the question of a similar analysis of soil radon and radon measurements in groundwater in the western part of the UAE, if such took place there. This is especially relevant since the largest operating four-unit Barakah NPP in the region is located in this part of the country. Another NPP is planned to be built nearby.

Acknowledgments

The authors would like to express special gratitude to Jacques LeBlanc for his assistance in finding materials for this article.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Седін В. Л., Бауск С. А., Ульянов В. Ю., Бікус К. М. Шкала оцінювання активності тектонічних розломів земної кори за інтенсивністю радоновиділення – застосування для об'єктів АЕС. *Світ геотехніки*. 2016. № 1. С. 10–14.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

2. Abu-Zeid M. M. Lithostratigraphy and framework of sedimentation of the subsurface Paleogene succession in northern Qatar, Arabian Gulf. *Neues Jahrbuch Für Geologie Und Paläontologie – Monatshefte*. 1991. Vol. 1991. Iss. 4. P. 191–204. DOI: <https://doi.org/10.1127/njgpm/1991/1991/191>
3. Althoyaib S. S., El-Taher A. Natural radioactivity measurements in groundwater from Al-Jawa, Saudi Arabia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 304. Iss. 2. P. 547–552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3874-7>
4. Benà E., Ciotoli G., Ruggiero L., Coletti C., Bossew P., Massironi M., ..., Sassi R. Evaluation of tectonically enhanced radon in fault zones by quantification of the radon activity index. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26124-y>
5. Cornwell A., El Dahan M. Exclusive: UAE planning second nuclear power plant, sources say. *Reuters*. 2024. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/uae-planning-second-nuclear-power-plant-sources-say-2024-04-26/>
6. Daneshvar M. R. M., Mansouri-Daneshvar P., Moussavi-Harami R., Gharaie M. H. M., Mahboubi, A., Khanehbad M., Feizie A., Ebrahimi M., Sadeghi A. A new insight into the evolution of the Qatar Arch to recognize faults and a new gas field. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2023. Vol. 13. Iss. 11. P. 2157–2170. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01674-7>
7. Erees F. S., Yener G., Salk M., Özbal Ö. Measurements of radon content in soil gas and in the thermal waters in Western Turkey. *Radiation Measurements*. 2006. Vol. 41. Iss. 3. P. 354–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.06.030>
8. Faryabi M., Mohammadi Behzad H. R., Shojaheydari R. Factors controlling 222-Rn activity of groundwater in Jiroft plain, Iran. *International Journal of Radiation Research*. 2024. Vol. 22. Iss. 3. P. 639–646. DOI: <https://doi.org/10.61186/ijrr.22.3.639>
9. González-Díez A., Soto J., Gómez-Arozamena J., Bonachea J., Martínez-Díaz J. J., Cuesta J. A., ..., Díaz de Terán J. R. Identification of latent faults using a radon test. *Geomorphology*. 2009. Vol. 110. Iss. (1–2). P. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.020>
10. Hunting Geology and Geophysics Limited. *Geological interpretation of digitally enhanced Landsat Imagery of Qatar*. 1983. Project No 220224. Government of Qatar, Industrial Development Technical Centre. 31 p.
11. LeBlanc J. Stratigraphic Lexicon: A revised guide to the Cenozoic Surface Formations of Qatar, Middle East (excluding the islands). *Biosis: Biological Systems*. 2021. Vol. 2. Iss. 4. P. 361–407. DOI: <https://doi.org/10.37819/biosis.001.04.0134361>
12. Manawi Y., Ahmad A., Subeh M., Hushari M., Bukhari S., Al-Sulaiti H. Evaluation of the Radon Levels in the Groundwater Wells of Qatar: Radiological Risk Assessment. *Water*. 2023. Vol. 15. Iss. 22. P. 4026–4046. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15224026>
13. Mehrabi A., Pirasteh S., Rashidi A., Pourkhosravani M., Derakhshani R., Liu G., Mao W., Xiang W. Incorporating Persistent Scatterer Interferometry and Radon Anomaly to Understand the Anar Fault Mechanism and Observing New Evidence of Intensified Activity. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13112072>
14. Oner F., Yigitoglu I., Yalim H. A. Measurements of radon concentrations in spa waters in Amasya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*. 2013. Vol. 157. Iss. 2. P. 221–224. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct130>
15. Rivers J. M., Skeat S. L., Yousif R., Liu C., Stanmore E., Tai P., Al-Marri S. M. The depositional history of near-surface Qatar aquifer rocks and its impact on matrix flow and storage properties. *Arabian Journal of Geosciences*. 2019. Vol. 12. Iss. 12. P. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4498-6>
16. Rivers J. M., Yousif R., Kaczmarek S. E., Al-Shaikh I. Cenozoic coastal carbonate deposits of Qatar: Evidence for dolomite preservation bias in highly-arid systems. *Sedimentology*. 2020. Vol. 68. Iss. 2. P. 771–787. DOI: <https://doi.org/10.1111/sed.12805>
17. Sadooni, F. *Geology of Qatar. A Brief Introduction*. Publication of The of Environmental Studies Center. Qatar-Doha, 2014. 40 p.
18. Sedin V. L., Ulyanov V. U. On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. Iss. 10. P. 1272–1279. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.10.1272-1279>
19. Sedin V. L., Ulyanov V. Yu., Zahil'skiy V. A., Kovba V. V., Horlach S. M., Bilyk V. V. On Radon Activity of Tectonic Faults in the Area of Siting the Sinop Npp in the Republic of Türkiye. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2023. No. 5. P. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241023.7.988>
20. Sherif M., Sefelnasr A., Ebraheem A. A., Al Mulla M., Alzaabi M., Alghafli K. Spatial and Temporal Changes of Groundwater Storage in the Quaternary Aquifer, UAE. *Water*. 2021. Vol. 13. Iss. 6. P. 864–888. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13060864>

21. Tabar E., Yakut H. Radon measurements in water samples from the thermal springs of Yalova basin, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. Vol. 299. Iss. 1. P. 311–319. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2845-8>
22. Tasaka S., Sasaki Y. Observations of Underground Water Radon Concentration at the Kamioka Mine, Gifu Prefecture (1). *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd Ser.)*. 1992. Vol. 45. Iss. 1. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.4294/zisin1948.45.1_1

В. Ю. УЛЬЯНОВ^{1*}, В. В. БІЛИК^{2*}

^{1*}Каф. «Інженерної геології та геотехніки», Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, ел. пошта uluanovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408

^{2*}Лабораторія досліджень атомних і теплових електростанцій, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, ел. пошта kolemasakar@gmail.com, ORCID 0000-0002-4435-2388

До питання про наявність радонової активності тектонічних розломів півострова Катар

Мета. У роботі передбачено дати сучасну оцінку радонової активності виявлених тектонічних розломів земної кори на підставі архівних даних із вимірювань радону в підземних водах, виконаних у північній і східній частинах півострова Катар. **Методика.** Подано додаткове розширене обґрунтування застосування в геологічних умовах півострова Катар інноваційної для цих умов методики виявлення ступеня активності тектонічних розломів скельної основи на підставі сторонніх вимірів радону в підземних водах за допомогою власної універсальної оцінної шкали. **Результати.** Сучасний аналіз раніше отриманих результатів вимірювань радону в підземних водах півострова Катар дав змогу припустити орієнтацію напрямків тектонічних розломів у північній і східних його частинах, і додатково виявити ступінь їхньої радонової активності в межах півострова з попередньою оцінкою величини переміщень по розломах. Також було припущено подібне і на прилеглий до півострова території західної частини ОАЕ, де розташована АЕС Барака. Це припущення базується на певній подібності геологічних і тектонічних умов регіону. **Наукова новизна.** Уперше було запропоновано розташування тектонічних розломів у межах північної та східної частин півострова Катар за даними радонометрії, виконаної з іншими цілями, і подано оцінку їхньої радонової активності та величин переміщення по розломах. Це сприяє підвищенню безпеки під час будівництва та експлуатації різних об'єктів, у т. ч. і підвищеного ступеня відповідальності, зокрема, важливих для економіки країни трубопровідних систем і транспортних комунікацій. **Практична значимість.** Запропонована методика може бути використана і в рамках сейсмомоніторингу будівельних майданчиків і на суміжних територіях інших країн, де подібні дослідження раніше не проводили.

Ключові слова: Катар; радонометрія; свердловини; вимірювання радону; тектонічні розломи

REFERENCE

1. Sedin, V. L., Bausk, E. A., Uluanov, V., & Bicus, K. M. (2016). Shkala ocinyuvannya aktyvnosti tektonichnykh rozlomiv zemnoyi kory za intensyvnystu radonovydilennya – zastosuvannya dlya obyektiv AES. *Svit geotekniky*, 1, 10-14. (in Ukrainian)
2. Abu-Zeid, M. M. (1991). Lithostratigraphy and framework of sedimentation of the subsurface Paleogene succession in northern Qatar, Arabian Gulf. *Neues Jahrbuch Für Geologie Und Paläontologie – Monatshefte*, 1991(4), 191-204. DOI: <https://doi.org/10.1127/njgpm/1991/1991/191> (in English)
3. Althoyaib, S. S., & El-Taher, A. (2014). Natural radioactivity measurements in groundwater from Al-Jawa, Saudi Arabia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 304(2), 547-552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3874-7> (in English)
4. Benà, E., Ciotoli, G., Ruggiero, L., Coletti, C., Bossew, P., Massironi, M., ..., & Sassi, R. (2022). Evaluation of tectonically enhanced radon in fault zones by quantification of the radon activity index. *Scientific Reports*, 12(1), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26124-y> (in English)
5. Cornwell, A., & El Dahan, M. (2024). Exclusive: UAE planning second nuclear power plant, sources say. *Reuters*. Retrieved from <https://www.reuters.com/business/energy/uae-planning-second-nuclear-power-plant-sources-say-2024-04-26/> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

6. Daneshvar, M. R. M., Mansouri-Daneshvar, P., Moussavi-Harami, R., Gharaie, M. H. M., Mahboubi, A., Khanehbad, M., Feizie, A., Ebrahimi, M., & Sadeghi, A. (2023). A new insight into the evolution of the Qatar Arch to recognize faults and a new gas field. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(11), 2157-2170. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01674-7> (in English)
7. Erees, F. S., Yener, G., Salk, M., & Özbal, Ö. (2006). Measurements of radon content in soil gas and in the thermal waters in Western Turkey. *Radiation Measurements*, 41(3), 354-361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.06.030> (in English)
8. Faryabi, M., Mohammadi Behzad, H. R., & Shojaeydari, R. (2024). Factors controlling 222-Rn activity of groundwater in Jiroft plain, Iran. *International Journal of Radiation Research*, 22(3), 639-646. DOI: <https://doi.org/10.61186/ijrr.22.3.639> (in English)
9. González-Díez, A., Soto, J., Gómez-Arozamena, J., Bonachea, J., Martínez-Díaz, J. J., Cuesta, J. A., ..., & Díaz de Terán, J. R. (2009). Identification of latent faults using a radon test. *Geomorphology*, 110(1-2), 11-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.020> (in English)
10. Hunting Geology and Geophysics Limited (1983). *Geological interpretation of digitally enhanced Landsat Imagery of Qatar, 220224*. Government of Qatar, Industrial Development Technical Centre. (in English)
11. LeBlanc, J. (2021). Stratigraphic Lexicon: A revised guide to the Cenozoic Surface Formations of Qatar, Middle East (excluding the islands). *Biosis: Biological Systems*, 2(4), 361-407. DOI: <https://doi.org/10.37819/biosis.001.04.0134> (in English)
12. Manawi, Y., Ahmad, A., Subeh, M., Hushari, M., Bukhari, S., & Al-Sulaiti, H. (2023). Evaluation of the Radon Levels in the Groundwater Wells of Qatar: Radiological Risk Assessment. *Water*, 15(22), 4026-4046. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15224026> (in English)
13. Mehrabi, A., Pirasteh, S., Rashidi, A., Pourkhosravani, M., Derakhshani, R., Liu, G., Mao, W., & Xiang, W. (2021). Incorporating Persistent Scatterer Interferometry and Radon Anomaly to Understand the Anar Fault Mechanism and Observing New Evidence of Intensified Activity. *Remote Sensing*, 13(11), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13112072> (in English)
14. Oner, F., Yigitoglu, I., & Yalim, H. A. (2013). Measurements of radon concentrations in spa waters in Amasya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 157(2), 221-224. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct130> (in English)
15. Rivers, J. M., Skeat, S. L., Yousif, R., Liu, C., Stanmore, E., Tai, P., & Al-Marri, S. M. (2019). The depositional history of near-surface Qatar aquifer rocks and its impact on matrix flow and storage properties. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(12), 1-33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4498-6> (in English)
16. Rivers, J. M., Yousif, R., Kaczmarek, S. E., & Al-Shaikh, I. (2020). Cenozoic coastal carbonate deposits of Qatar: Evidence for dolomite preservation bias in highly-arid systems. *Sedimentology*, 68(2), 771-787. DOI: <https://doi.org/10.1111/sed.12805> (in English)
17. Sadooni, F. (2014). *Geology of Qatar. A Brief Introduction*. Publication of The of Environmental Studies Center. Qatar-Doha. (in English)
18. Sedin, V. L., & Ulyanov, V. U. (2019). On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment. *Vestnik MGSU*, 14(10), 1272-1279. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.10.1272-1279> (in English)
19. Sedin, V. L., Ulyanov, V. Yu., Zahilskyi, V. A., Kovba, V. V., Horlach, S. M., & Bilyk, V. V. (2023). On Radon Activity of Tectonic Faults in the Area of Siting the Sinop Npp in the Republic of Türkiye. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5, 7-18. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241023.7.988> (in English)
20. Sherif, M., Sefelnasr, A., Ebraheem, A. A., Al Mulla, M., Alzaabi, M., & Alghafli, K. (2021). Spatial and Temporal Changes of Groundwater Storage in the Quaternary Aquifer, UAE. *Water*, 13(6), 864-888. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13060864> (in English)
21. Tabar, E., & Yakut, H. (2013). Radon measurements in water samples from the thermal springs of Yalova basin, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299(1), 311-319. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2845-8> (in English)
22. Tasaka, S., & Sasaki, Y. (1992). Observations of Underground Water Radon Concentration at the Kamioka Mine, Gifu Prefecture (1). *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd Ser.)*, 45(1), 1-9. DOI: https://doi.org/10.4294/zisin1948.45.1_1 (in English)

Надійшла до редколегії: 15.08.2024

Прийнята до друку: 17.12.2024

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.216.2-048.35

М. Б. КУРГАН¹, А. М. КУРГАН², О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ^{3*}, Р. В. ІВАНОВ⁴,
Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА⁵

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Дніпропетровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

^{3*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

⁴Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

⁵Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта hmelevnela@gmail.com, ORCID 0000-0002-2360-8671

Модернізація наявних переїздів на напрямках будівництва в Україні залізничної колії європейського стандарту

Мета. У статті передбачено проаналізувати сучасні технологічні рішення для підвищення рівня безпеки на залізничних переїздах, запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення безперебійного руху транспорту. **Методика.** Дослідження базується на застосуванні математичного моделювання та чисельних методів для аналізу впливу модернізації та нових проєктів на рівень безпеки залізничних переїздів. За допомогою комп'ютерного моделювання побудовано математичні моделі, які відображають різні сценарії функціонування переїздів. На основі отриманих даних проведено оцінку ефективності запропонованих заходів та розроблено рекомендації щодо подальшої оптимізації системи безпеки. Для оцінки ефективності запропонованих заходів розроблено систему показників, що дозволяють кількісно оцінити рівень безпеки залізничних переїздів до та після модернізації. Ці показники враховують в себе добову інтенсивність руху поїздів через переїзд, добову інтенсивність руху транспорту на автомобільній дорозі, устаткування переїзду, радіус кривої у плані та поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду. **Результати.** Запропоновано вдосконалення методу підсумкового коефіцієнта аварійності, який є одним із поширених інструментів для оцінки безпеки руху на залізничних переїздах. Застосування цього методу дозволило кількісно оцінити рівень ризику виникнення аварійних ситуацій та проаналізувати ефективність заходів, спрямованих на підвищення безпеки. Метод відносно простий у застосуванні та не вимагає складних математичних обчислень, дозволяє врахувати широкий спектр факторів, що впливають на безпеку руху на переїзді, таких як інтенсивність руху, конструктивні особливості переїзду, наявність сигналізації тощо. За допомогою підсумкового коефіцієнта проведено порівняння рівня безпеки різних переїздів та відстежено динаміку змін їхнього устаткування в часі. Це дозволило визначити переїзди, які потребують першочергової модернізації, а також прогнозувати зміни у вихідних і розрахункових даних та планувати заходи з впровадження інноваційних технологій, що підвищують безпеку руху на переїздах. **Наукова новизна.** Розроблено інтегровану модель оцінки безпеки залізничних переїздів, яка враховує не лише традиційні показники (частота аварій, інтенсивність руху), але й нові фактори, такі як надійність обладнання, людський фактор та вплив зовнішніх умов. Запропонована модель дозволяє визначити більш точний прогноз ризиків та обирати оптимальні рішення щодо модернізації переїздів з урахуванням конкретних умов експлуатації. **Практична значимість.** Сформульовані рекомендації можуть бути використані

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

для розробки ефективних програм модернізації залізничних переїздів в Україні. Упровадження запропонованих технологій дозволить підвищити рівень безпеки руху на 20 % та зменшити середній час очікування на переїзді на 15 %. Крім того, це сприятиме підвищенню пропускної спроможності залізниць та зниженню витрат на утримання інфраструктури.

Ключові слова: залізничний переїзд; інтероперабельність; модернізація; суміщена колія; безпека дорожнього руху

Вступ

Залізничні переїзди становлять ключову проблему для дослідників та практиків у галузі безпеки дорожнього руху та залізничного транспорту. Незважаючи на те, що проблема дорожньо-транспортних пригод на залізничних переїздах не є новою, у всьому світі тривають дослідження та аналіз статистики в цій галузі.

Забезпечення мобільного руху поїздів, перш за все з країн ЄС, є актуальним завданням для України. Європейська комісія та Європейський інвестиційний банк розробили стратегію з інтеграції залізничних мереж України, Молдови та Євросоюзу [1]. Передбачено, що нова магістральна мережа колії 1 435 мм працюватиме паралельно з наявних – 1 520 мм. Нову використовуватимуть для міжнародних пасажирських поїздів, Інтерсіті, перевезення вантажів у контейнерах чи на платформах. Надалі можливе розширення залізничної мережі 1 435 мм до таких великих українських міст, як Запоріжжя, Херсон, Миколаїв, Маріуполь, Донецьк, Луганськ та Севастополь (чотири останні перебувають під тимчасовою окупацією).

У цій роботі розглянуто питання будівництва переїздів на ділянках як нової траси європейської колії 1 435 мм, так і реконструкції окремих напрямків під євростандарт з застосуванням суміщеної колії (1 435/1 520 мм).

У США та Канаді для оцінки ризиків на залізничних переїздах використовують декілька різних моделей. Найпоширеніші з них:

- ALCAM (As Low As Can Be As Reasonably Achievable);
- Haddon Matrix;
- Level Crossing Risk Assessment Model (LCRAM).

Для захисту залізничних переїздів спеціалізована компанія ALTPRO (Німеччина) широко впроваджує електронну систему RLC23. Цю систему використовують для підвищення безпеки

на залізничних переїздах шляхом автоматичного керування шлагбаумами, світлофорами та іншими попереджувальними сигналами.

Питання оцінки безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільних доріг і залізниць на одному рівні й підвищення ефективності роботи залізничних переїздів розглянуто в роботі авторів [3].

На засіданні Австралійської транспортної ради (ATC) у травні 2003 року був прийнятий інноваційний метод оцінки ризиків. Наразі у всіх австралійських штатах і в Новій Зеландії застосовують дорожню модель ALCAM (As Low As Can Be As Reasonably Achievable), яка складається з трьох окремих компонентів: моделі інфраструктури, моделі експозиції та моделі наслідків. У поєднанні ці три компоненти утворюють унікальний показник ризику для кожного переїзду [16].

Представляють інтерес напрацювання Групи експертів з підвищення безпеки на залізничних переїздах в країнах-членах ЄК ООН та інших обраних країнах [7], що пов'язано з відсутністю уніфікованих визначень і методів. Показано, що технічні рішення мають обмежене застосування через фінансову неможливість заміни всіх переїздів естакадними або підземними переходами чи встановлення сучасного обладнання з метою попередження або виявлення небезпеки, коли до переїзду наближається поїзд.

До аналогічного висновку дійшли автори в роботі [14]. За допомогою анкет та візуального огляду вони визначили ризики безпеки та небезпечні події на деяких залізничних переїздах транзитного маршруту, які були класифіковані на основі принципу ALARP (As Low As Reasonably Practicable) та загальної матриці рейтингу ризиків. Результати дослідження показали, що близько 22 % небезпек, визначених за категоріями, пов'язані з людськими факторами, тоді як 20 % викликані технічними.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ALCAM і ALARP – це два підходи до визначення та управління ризиками, які використовують

для зниження кількості аварій на залізничних переїздах та підвищення рівня безпеки. Основні відмінності між ними наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Ключові відмінності двох підходів до визначення й управління ризиками

Table 1

Key differences between two approaches to risk identification and management

Характеристика	ALCAM	ALARP
Рівень прийнятного ризику	Прагне до найнижчого можливого ризику, незалежно від витрат	Допускає вищий рівень ризику, якщо його неможливо знизити за розумною ціною
Зосередження під час оцінки та управління ризиками	Зосереджується на технічних заходах для зниження ризику	Враховує як технічні, так і економічні фактори під час прийняття рішень щодо ризику
Процес прийняття рішень	Ґрунтується на об'єктивних даних та аналізі	Використовує більш суб'єктивний підхід, який враховує думки та цінності зацікавлених сторін

На залізничних переїздах Нової Зеландії спочатку застосовували австралійську модель оцінки аварійних переїздів ALCAM. Але й вона має свої обмеження, якщо її використовувати окремо. ALCAM недостатньо детально враховує вплив на безпеку, яку створює навколишня транспортна мережа [17]. Із врахуванням цього в Новій Зеландії запроваджено нову систему оцінки ризику – модель LCSS [10], у якій для отримання об'єктивної інформації про залізничні переїзди розглянуто три додаткові показники, пов'язані з ризиком аварій: історичні дані про аварії та інциденти, спостереження з безпеки руху, а також оцінку впливу наявної схеми залізничного переїзду та її взаємодію з навколишньою транспортною мережею. Такий підхід допомагає визначити, чи потрібно оновлювати наявні залізничні переїзди.

У статті [9] розглянуто питання, пов'язані із дотриманням безпеки руху великовантажних транспортних засобів на залізничних переїздах Австралії. Результати показали, що такі фактори, як рівень обслуговування транспортного потоку, частка великовантажних транспортних засобів та відстань від залізничних переїздів до найближчого перехрестя пов'язані з підвищеним ризиком, коли великовантажний транспор-

тний засіб бере участь у зіткненнях на залізничних переїздах.

У роботі [7] розглянуто залізничні переїзди в Боснії та Герцеговині. Сформовано п'ятнадцять різних показників, які були поділені на три групи: критерії безпеки, характеристики експлуатації автомобільних доріг та характеристики експлуатації залізниць. Для визначення критеріїв значущості була сформована нова інтегрована нечітка модель FUCOM. Результати показали, що переїзди LC4 і LC8 є найбільш безпечними за всіма 15 критеріями. Автори запропонували заходи щодо забезпечення стійкої роботи залізничної системи.

Щоб зменшити частоту аварій та тяжкість травм, розглянуто моделі, які часто використовують для автомобільної та залізничної мережі [9]. Порівняння моделей виконано з урахуванням основних характеристик залізниці, які впливають на ймовірність ДТП на переїздах (швидкість поїзда, кількість залізничних колій і їхній стан, кількість поїздів за добу, геометричні дані залізниці, помітність поїзда тощо); дорожніх факторів (стан дорожнього полотна, геометричні параметри автодороги, тип транспортного засобу, інтенсивність дорожнього руху, кількість смуг, тип і ширина дорожнього покриття, освіт-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

леність тощо); факторів навколишнього середовища (погодні умови, умови освітлення, час доби та пора року); людських чинників (стать, вік, рівень кваліфікації й реакції водія).

Зіткнення учасників дорожнього руху і поїздів на залізничних переїздах (RLX) залишаються нерозв'язною проблемою. Автори [13] на основі досліджень, опублікованих із 1989 по 2019 рік, запропонували класифікацію за такими факторами: частота і тяжкість аварій (1); небезпечна та невідповідна поведінка учасників дорожнього руху (2); сприйняття ризику, ставлення та переконання учасників дорожнього руху (3). Установлено, що більшість факторів, виявлених під час досліджень, стосуються фізичних характеристик самого переїзду, його функціонування, а також поведінки та характеристик учасників дорожнього руху. Було виявлено, що взаємодіям між факторами приділено недостатньо уваги. На додаток до людських і соціальних витрат ці події тягнуть за собою істотні економічні збитки.

Переїзди стали пріоритетною темою для Управління залізниць і доріг (ORR) Великобританії. У роботі [12] зазначено, що на більш ніж 7 000 залізничних переїздів у Великобританії не існує універсального підходу до безпеки, кожен залізничний переїзд є унікальним, а тому слід упроваджувати інновації, що підвищують безпеку залізничних переїздів. Принципи ORR з управління безпекою залізничних переїздів покликані допомогти знизити ризики шляхом розгляду альтернатив залізничним переїздам, а там, де це практично неможливо – шляхом проєктування реконструкції залізничних переїздів.

У документі [15] подано базу даних «країн ERA», яка містить інформацію про залізничні переїзди за десять років. Показано, що технічні рішення мають обмежене застосування і рекомендовано для поліпшення інформування про наближення поїздів водіїв автотранспортних засобів використовувати технологію GPS.

В Україні в рамках системи АІС «Переїзд» використовують комбінований підхід до визначення та управління ризиками на залізничних переїздах, який поєднує елементи АLCAM та АLARP.

Короткий огляд наукових праць мав на меті визначити основні фактори і їхній вплив на ризики, що мають місце в багатьох країнах під час

вирішення проблем безпеки на залізничних переїздах, також розглянути заходи з модернізації наявних переїздів на напрямках будівництва в Україні залізничної колії європейського стандарту.

Мета

У роботі передбачено провести аналіз сучасних технологічних рішень для підвищення рівня безпеки на залізничних переїздах, запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення безперебійного руху транспорту.

Методика

Постає питання щодо збігу категорій переїздів на залізницях європейських країн та України. Категорії переїздів LC1–LC5 були введені в 1976 році в рамках Директиви Ради Європейських співтовариств 76/581/ЄС про встановлення єдиних технічних вимог до будівництва та експлуатаційних вимог до переїздів на залізницях.

Директива 76/581/ЄС була замінена Директивою Ради Європейських співтовариств 2008/57/ЄС, яка відома також як «Директива про інтегрованість систем залізничного транспорту в Спільноті». Ця директива встановлює правила та стандарти для забезпечення інтегрованості на залізничному транспорті в Європейському Союзі, включаючи стандарти безпеки для залізничних переїздів.

Європейська класифікація переїздів містить кілька класів, які вказують на різні рівні безпеки та технічної складності. До основних класів належать:

LC1 – цей клас вказує на переїзди з найнижчим рівнем безпеки. Вони можуть бути простими без будь-яких додаткових безпекових заходів, таких як бар'єри чи світлофори. Такі переїзди потребують особливої обережності з боку водіїв та пасажирів;

LC2 – цей клас вказує на переїзди з певними додатковими безпековими заходами, такими як світлофори, додаткові сигнальні пристрої або бар'єри. Вони забезпечують вищий рівень безпеки, аніж LC1, але все ще можуть вимагати обережності з боку водіїв;

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

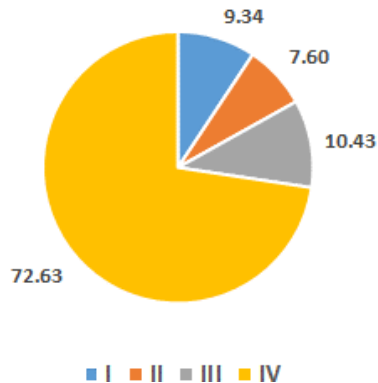


Рис. 1. Категорійність переїздів на залізницях України (%)

Fig. 1. Categorization of railway crossings in Ukraine (%)

LC3–LC8 – ці класи вказують на переїзди з більш високим рівнем безпеки. Вони зазвичай мають кілька ступенів безпекових заходів, включаючи бар'єри, світлофори, звукові та візуальні сигнали, а також системи автоматичного зупинення поїздів. Ці переїзди є найбільш безпечними та надійними для перетину залізничних колій.

В Україні категорії переїздів та їх характеристики визначають «Правила технічної експлуатації залізничного транспорту України», а також «Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів» (ЦП-0174) [5].

Залізничні переїзди на мережі залізниць України поділяють на чотири різні категорії, кожна з яких є унікальною в разі оцінки ризику перетину (рис. 1). Фактори, які взято до уваги, включають частоту руху поїздів, частоту руху і типи користувачів, а також середовище, у якому розташовані переходи.

Інструкція з безпеки руху по залізницях визначає технічні вимоги та стандарти щодо обладнання переїздів, за різними категоріями та характеристиками. Ці документи розроблені для забезпечення безпеки руху по залізницях та визначення стандартів для всіх елементів інфраструктури, зокрема і переїздів.

Категорії переїздів визначають за характером та інтенсивністю руху поїздів, транспортних засобів у місці перетину із залізницею та умовами видимості (табл. 2).

Таблиця 2

Категорії залізничних переїздів загального користування

Table 2

Categories of public railway crossings

Інтенсивність руху поїздів по головній колії сумарно в 2-х напрямках, поїздів/добу	Інтенсивність руху транспортних засобів, авт./добу				
	До 200 включно	201 – 1 000	1 001 – 3 000	3 001 – 7 000	Понад 7 000
До 16 включно, так само по всіх станційних і під'їзних коліях	IV	IV	IV	III	II
17 – 100	IV	IV	III	II	I
101 – 200	IV	III	II	I	I
Понад 200	III	II	II	I	I

До переїздів загального користування I категорії належать також переїзди, розташовані на перетинах залізничних колій, де поїзди рухаються зі швидкістю 140 км/год і більше незалежно від інтенсивності руху транспортних засобів на автомобільній дорозі.

Сьогодні в підпорядкуванні АТ «Укрзалізниця» перебуває 4 945 залізничних переїздів, із

яких 2 343 – з автобусним рухом; 1 290 – із черговим працівником; 1 262 – обладнані пристроями автоматики, у тому числі 383 переїзди обладнані чотирма шлагбаумами, які забезпечують разом з основними шлагбаумами повне перекриття проїжджої частини автодороги (рис. 2).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

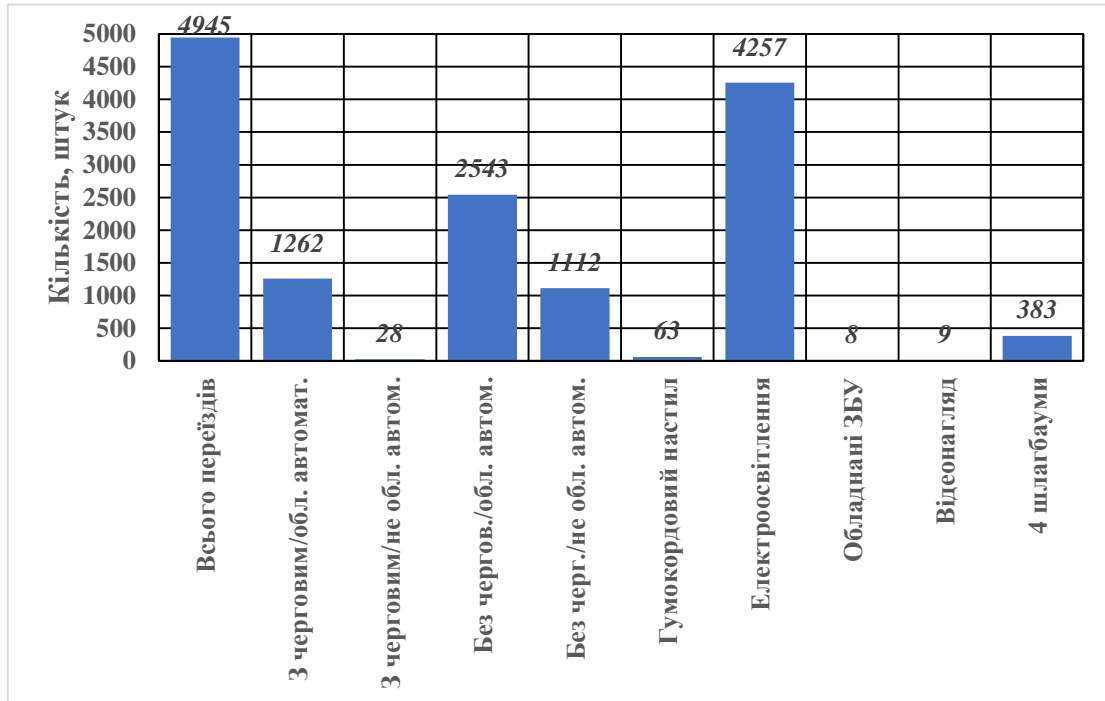


Рис. 2. Технічне оснащення переїздів на залізницях України

Fig. 2. Technical equipment of railway crossings in Ukraine

Майже половина всіх переїздів розташована на маршрутах основних пасажирських перевезень. Тому постає проблема утримання й обслуговування місць перетину залізниці й автодороги, а з урахуванням переходу на європейську або суміщену колію постає питання щодо будівництва нових чи реконструкції наявних залізничних переїздів.

Серед підходів, що усувають або суттєво зменшують аварії на залізничних переїздах, можна виділити такі: управління ризиками, технології та інновації, управління компетенціями, освіта та правозастосування. Для оцінки безпеки руху залізничного транспорту та автотранспортних засобів у зоні залізничних переїздів використовуємо метод підсумкового коефіцієнта аварійності, який дає змогу оцінити стан безпеки в результаті проведеної модернізації чи нових

проектних рішень [4]. Величину K_a для залізничного переїзду визначаємо шляхом перемноження семи коефіцієнтів аварійності

$$K_a = \prod_{i=1}^7 K_i = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7. \quad (1)$$

До цього часу в методі підсумкового коефіцієнта аварійності коефіцієнти $K_2 \dots K_7$ задають детерміновано для певного інтервалу, вони мають стрибкоподібний характер. Це впливає на остаточний результат і може призвести до різних заходів із підвищення безпеки руху на залізничних переїздах. Усунути вказані недоліки методу підсумкового коефіцієнта можна, використовуючи формули і графіки, запропоновані в роботі авторів [2], рис. 3.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

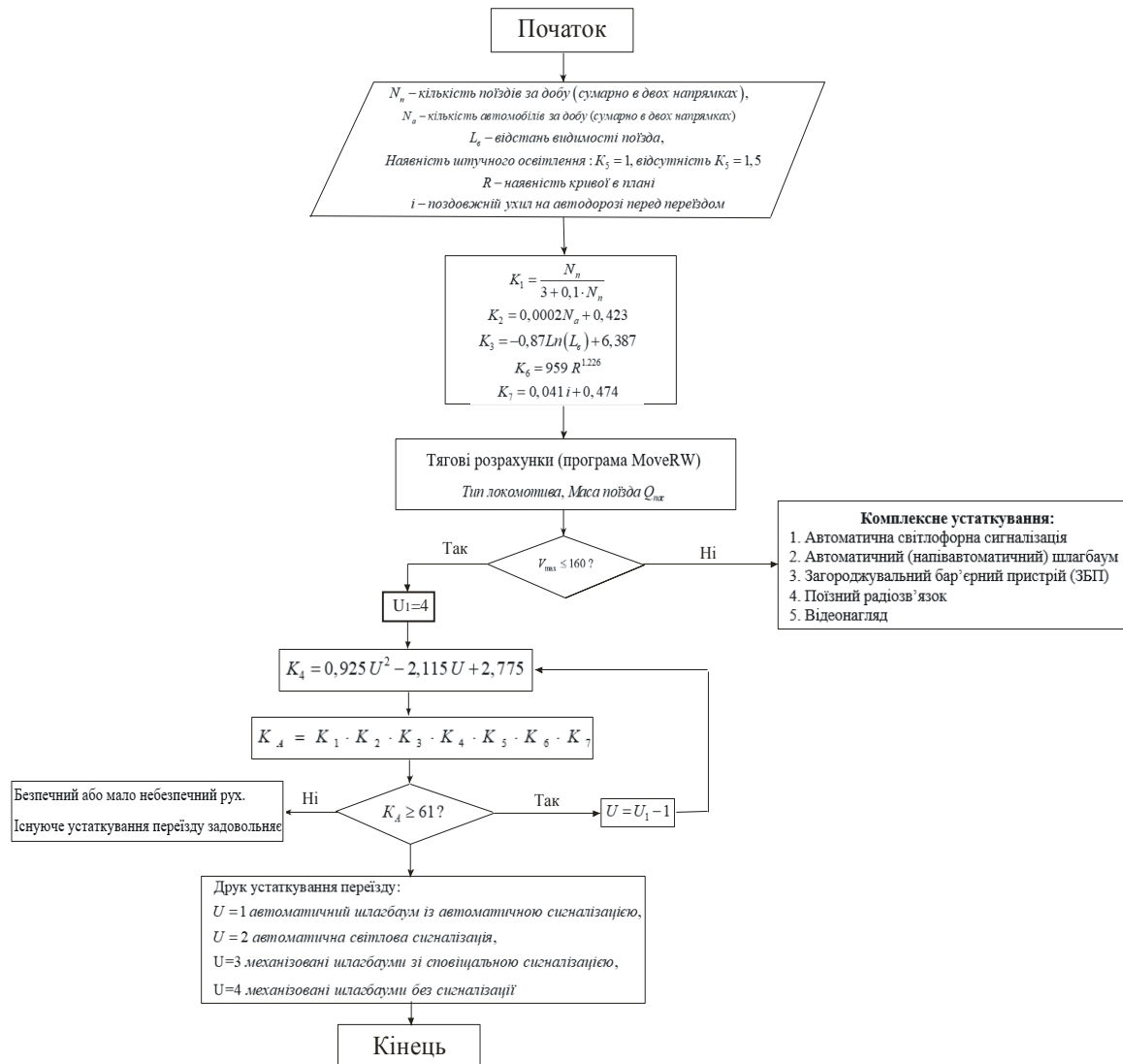


Рис. 3. Схема алгоритму визначення устаткування переїзду залежно від підсумкового коефіцієнта аварійності

Fig. 3. Diagram of the algorithm for determining the crossing equipment depending on the final accident rate

Передбачено, що перед упровадженням швидкісного руху поїздів на тому чи іншому напрямку буде проведено комплекс робіт, необхідний для реалізації максимальної швидкості руху $160 < V_{max} \leq 200$. Нижче наведено опис алгоритму визначення устаткування переїзду залежно від підсумкового коефіцієнта аварійності:

1. З автоматизованої системи «Переїзд» вводять вихідні дані, необхідні для розрахунку коефіцієнтів K_1 , K_2 , K_3 , K_5 , K_6 , K_7 , а саме: N_n – кі-

лькість поїздів на добу; N_a кількість транспортних засобів на добу в обох напрямках; наявність штучного освітлення переїзду (наявне – 1, відсутнє – 1,5), радіус кривої у плані на підходах до переїзду R ; поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду i .

2. За формулами (табл. 2) розраховують коефіцієнти K_i , що впливають на безпеку руху.

3. Вводять вихідні дані для роботи програми MoveRW: поздовжній профіль, план лінії, обмеження швидкості руху поїзда, дані про рухомий склад (тип локомотива, маса поїзда тощо).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

4. За допомогою програми MoveRW виконують тягові розрахунки для встановлення рівня швидкості руху пасажирського поїзда в місці розташування переїзду.

5. Установлюють рівень швидкості на переїзді. Якщо рівень швидкості менше ніж 160 км/год, то задають устаткування на переїзді U_i ($i = 4 \dots 1$), і після кожного заданого значення U_i розраховують коефіцієнт аварійності K_A . Якщо $K_A \leq 40$ – безпечний або $40 < K_A \leq 60$ – малонебезпечний, то може бути прийняте рішення зупинити процес пошуку й прийняти устаткування переїзду.

6. Якщо $V_{\max} > 160$ – швидкісний рух, то беруть комплексне устаткування, що містить: ав-

томатичну світлофорну сигналізацію, автоматичний (напівавтоматичний) шлагбаум, загороджувальний бар’єрний пристрій (ЗБП), поїзний радіозв’язок і відеонагляд.

Дослідження за методом патентної і технічної статистики більше ніж 750 літературних джерел із забезпечення пропускної спроможності та безпеки руху транспорту на переїздах дозволили встановити міжнародний ранг значимості, його експертну оцінку та коефіцієнт динамічності розробок окремих елементів переїзної сигналізації [11].

Статистичний аналіз показав, що світлофори мають коефіцієнт динамічності +0,016; шлагбауми –0,155; пристрої загороджування –0,234 (табл. 3).

Таблиця 3

Напрямки вдосконалення пристроїв систем переїзної сигналізації

Table 3

Directions for improving railway crossing signaling system devices

Пристрої	Статистичний аналіз			Експертна оцінка рангу напрямку (якісний аналіз)		
	% від усіх джерел	Міжнародний ранг значимості	Коефіцієнт динамічності	Розвинуті країни	Пост-радянські країни	Україна
Устаткування переїзду:	Всього 20					
світлофори	9	0,10	+0,016	2	1	1
шлагбауми	7	0,08	–0,155	4	2	2
пристрої загороджування	4	0,10	–0,234	3	1	–

Устаткування на переїздах – світлофори, шлагбауми, загороджувальні бар’єрні пристрої (ЗБП) – характеризується міжнародним рангом значимості (КСР) і коефіцієнтом динамічності (МРС).

Міжнародний ранг значимості (International Importance Ranking) – МРС. Цей показник відображає важливість або значимість переїзду в міжнародному контексті. Його можна визначити на основі кількох факторів, таких як обсяг пасажирських або вантажних перевезень, важливість маршрутів, наявність зав’язків з іншими міжнародними транспортними коридорами тощо. Переїзди з вищим міжнародним рангом

значимості можуть вимагати більшої уваги щодо їх безпеки та обслуговування. Отже, МРС – це характеристика, яка визначає ефективність загороджувального пристрою в запобіганні зіткненням транспортних засобів із поїздами. Його визначають на основі таких факторів:

- безпека руху: ступінь захисту загороджувального пристрою від зіткнень транспортних засобів із поїздами;
- ефективність: ступінь впливу загороджувального пристрою на пропускну здатність переїзду;

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

– вартість: вартість будівництва, експлуатації та обслуговування загороджувального пристрою.

Міжнародний ранг значимості загороджувальних пристроїв визначають за шкалою від 1 до 5, де 1 – найнижчий ранг, а 5 – найвищий:

$$MPC = (\text{Безпека руху} \cdot 3 + \text{Ефективність} \cdot 2 + \text{Вартість}) / 6. \quad (2)$$

Для розрахунку міжнародного рангу значимості кожній характеристиці присвоюють певну вагову оцінку. Безпека руху має максимальну вагову оцінку 3, оскільки це найважливіша характеристика загороджувального пристрою. Ефективність має вагову оцінку 2, оскільки вона також є важливою характеристикою. Вартість має вагову оцінку 1, оскільки вона менш важлива, ніж безпека руху та ефективність.

Відповідно до формули (2),

$$MPC = (3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1) / 6 = 2,33$$

Таким чином, світлофор з автоматичним закриттям має міжнародний ранг значимості 2,33, що означає, що його ранг значимості на 33 % нижчий за світлофор із найвищим рангом значимості.

Світлофор із найвищим рангом значимості – це світлофор, який має найвищий бал за міжнародною шкалою значимості світлофорів. Цю шкалу використовують для оцінки важливості світлофорів на основі таких факторів:

інтенсивність руху – кількість транспортних засобів і пішоходів, які проїжджають через перехрестя щодня;

швидкість руху – максимальна дозволена швидкість на цій ділянці дороги;

кількість аварій – історія аварій на перехресті;

наявність шкіл, лікарень та інших важливих об'єктів – світлофори, розташовані поблизу таких об'єктів, зазвичай мають вищий ранг значимості.

Міжнародна шкала значимості світлофорів є лише рекомендацією, і остаточне рішення про те, який світлофор має найвищий ранг, приймає місцева влада. Однак можна припустити, що світлофори з найвищим рангом значимості наявні в мегаполісах із високим рівнем інтенсивності руху, наприклад, у таких містах, як Токіо, Нью-Йорк, Лондон, а також на жвавих перехрестях із високою швидкістю руху (на автомагістралях);

у місцях із високим ризиком аварій (на перехрестях із поганою видимістю); поблизу шкіл, лікарень та інших важливих об'єктів. Важливо зазначити, що навіть світлофори з найвищим рангом значимості не гарантують повну безпеку на дорогах.

Коефіцієнт динамічності (Dynamic Factor) – КД. Цей показник вказує на ступінь динамічності переїзду, тобто його схильність до змін руху транспортних засобів, інтенсивності перевезень тощо. Він допомагає оцінити рівень важливості та ризику на конкретному переїзді, що дозволяє залізничним операторам, владі та іншим зацікавленим сторонам приділяти належну увагу певним переїздам у плануванні заходів безпеки та розвитку інфраструктури. Отже, КД – це характеристика, яка визначає, наскільки швидко загороджувальний пристрій може закрити переїзд. Його визначають на основі таких факторів:

час закриття – час, за який загороджувальний пристрій закриває переїзд;

час відкриття – час, за який загороджувальний пристрій відкриває переїзд.

Коефіцієнт динамічності загороджувальних пристроїв визначають за шкалою від 1 до 10, де 1 – найнижчий коефіцієнт, а 10 – найвищий.

Для розрахунку коефіцієнта динамічності час закриття і відкриття загороджувального пристрою вимірюють у секундах:

$$КД = (\text{Час закриття} + \text{Час відкриття}) / 60. \quad (3)$$

Результати

Для розрахунку Коефіцієнта динамічності світлофора з автоматичним закриттям можна використовувати такі дані: час закриття – 5 секунд, час відкриття – 5 секунд. Відповідно до формули (3), Коефіцієнт динамічності світлофора з автоматичним закриттям становитиме:

$$КД = (5 + 5) / 60 = 0,167.$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Таким чином, світлофора з автоматичним закриттям становить коефіцієнт динамічності 0,167, що означає, що він має на 16,7 % більшу динамічність, ніж інші загороджувальні пристрої.

Якщо розглянути шлагбауми з автоматичним закриттям, то для розрахунку міжнародного рангу значимості можна використовувати такі дані: безпека руху – 2,5; ефективність – 2; вартість – 1. Відповідно до формули (2), міжнародний ранг значимості шлагбаума з автоматичним закриттям становитиме:

$$MPC = (2,5 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1) / 6 = 2,167.$$

Таким чином, шлагбаум з автоматичним закриттям має MPC = 2,167, що означає, що на 43,3 % нижче за світлофор із найвищим рангом значимості.

Для розрахунку міжнародного рангу значимості загороджувальних бар'єрних пристроїв (ЗБП), можна використовувати такі дані: безпека руху – 2; ефективність – 1,5; вартість – 1. Відповідно до формули (2), міжнародний ранг значимості ЗБП становитиме:

$$MPC = (2,0 \cdot 3 + 1,5 \cdot 2 + 1 \cdot 1) / 6 = 1,833.$$

Таким чином, ЗБП мають MPC = 1,833, що на 46,7 % нижче за світлофор із найвищим рангом значимості.

Для розрахунку коефіцієнта динамічності ЗБП можна використовувати такі дані: час закриття – 15 секунд, час відкриття – 15 секунд. Відповідно до формули (3), коефіцієнт динамічності ЗБП становитиме:

$$KD = (15 + 15) / 60 = 0,50.$$

Таким чином, ЗБП мають KD = 0,5, що вказує меншу на 50 % динамічність, ніж світлофора з автоматичним закриттям.

Розрахунок міжнародного рангу значимості і коефіцієнта динамічності для декількох десятків переїздів на ділянці залізниці можна виконати за допомогою електронних таблиць або спеціалізованого програмного забезпечення.

Відповідно до цих характеристик, загороджувальні пристрої на переїздах можна поділити на такі групи:

Група 1: пристрої з найвищим міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. До цієї групи належать світлофори зі звуковою сигналізацією і шлагбауми з автоматичним закриттям.

Група 2: пристрої з високим міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. До цієї групи належать світлофори зі звуковою сигналізацією і пристрої загороджування з автоматичним закриттям.

Група 3: пристрої з середнім міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. До цієї групи належать світлофори без звукової сигналізації і шлагбауми з ручним закриттям.

Група 4: пристрої з низьким міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. Сюди належать пристрої загороджування з ручним закриттям.

Важливо зазначити, що MPC та КД не завжди чітко відповідають групам, тобто пристрій може мати характеристики, що не відповідають його групі. Під час вибору загороджувального пристрою важливо враховувати всі фактори, а не лише групу. Наприклад, світлофор зі звуковою сигналізацією та без шлагбаума може мати MPC та КД, що відповідають Групі 2, а не Групі 1. Шлагбаум із ручним закриттям, який використовують на переїзді з високим ризиком аварій, може мати MPC та КД, що відповідають Групі 3. Рекомендовано перевіряти MPC та КД конкретного загороджувального пристрою перед його використанням.

У наведених даних «Статистичний аналіз» (табл. 3) вказано значення коефіцієнта рангу значимості (MPC) для шлагбаумів і пристроїв загороджування. Значення MPC для шлагбаумів і пристроїв загороджування є негативними, що означає, що вони мають нижчий ранг значимості, ніж світлофори. Зокрема, значення MPC для шлагбаумів дорівнює -0,155, що означає, що вони мають ранг значимості на 15,5 % нижче ніж світлофори. Значення MPC для пристроїв загороджування дорівнює -0,234, що означає, що вони мають ранг значимості на 23,4 % нижче ніж світлофори. Тобто світлофори є більш ефективними для запобігання зіткненням транспортних засобів із поїздами, ніж шлагбауми і пристрої загороджування.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Вибір загороджувального пристрою для конкретного переїзду – це комплексне завдання, під час вирішення якого необхідно враховувати такі фактори: інтенсивність руху транспорту на переїзді; вид транспорту, який перетинає переїзд; швидкість руху транспорту на переїзді; ширина переїзду; географічні умови в місці розташування переїзду; економічні фактори (вартість будівництва, експлуатації та обслуговування загороджувального пристрою).

Остаточний вибір типу пристрою безпеки для переїзду залежить від таких факторів, як рівень безпеки, якого необхідно досягнути, вартість пристрою, складність обслуговування пристрою.

Вище було зазначено, що в цій роботі розглянуто питання будівництва переїздів на ділянках як нової траси європейської колії 1 435 мм, так і реконструкції окремих напрямків під євростандарт із застосуванням суміщеної колії (1 435/1 520 мм). Зрозуміло, що конструкція переїздів у цих випадках буде різною. Наприклад, на напрямку Львів – Київ ділянка державний кордон – Ковель – Сарни – Коростень є одноколісною. Отже, можна розглядати два варіанти:

– варіант 1: залишають наявну колію шириною 1 520 мм та будують другу головну колію шириною 1 435 мм;

– варіант 2: залишають одноколісну ділянку з укладанням суміщеної колії 1 520\1 435 мм.

Дніпровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» розробляє стандарт і конструкцію переїздів з універсальним залізобетонним настилом через залізничні колії з рейками типу Р65 та UIC60. Стандарт застосо-

вують під час проектування переїзду з універсальним залізобетонним настилом через залізничні колії, його поточного утримання та ремонту.

Розглянемо особливості конструкції колії в зоні переїзду, які впливають на характеристики її напружено-деформованого стану. Настил сучасного залізничного переїзду, як правило, складається з трьох рядів залізобетонних плит. Для двоколісної ділянки кожен ряд має шість плит, які укладають до і після рейки, вони мають обпирання з жорстким кріпленням до залізобетонної шпали спеціальної конструкції. По довжині колії кожна плита прикріплена до п'яти шпал.

Для встановлення розрахункових варіантів проведено статистичний аналіз паспортів переїздів на окремих напрямках регіональних філій: Київ – Коростень (Південно-Західна залізниця), Здолбунів – Львів (Львівська залізниця), П'ятихатки – Дніпро – Чаплине (Придніпровська залізниця) та ін. Установлено, що кут перетину автодороги із залізницею складає в основному 90°, зустрічаються деякі перетини під кутом 60° і навіть менше. Ширина переїзду коливається в основному від 6,0 до 11,0 метрів.

Для переїздів із двома та більше коліями кількість плит помножують на кратне число колії.

У роботі розглянуто різні варіанти переїздів, що включають кут перетину залізниці автомобільною дорогою і ширину проїжджої частини. Для кожного з варіантів визначено обсяги робіт і розраховано укрупнені показники вартості влаштування залізничного переїзду під час капітального ремонту (K):

$$K = -0,0085a^2b^2 + 0,1403a^2b - 0,2946a^2 + 0,624ab^2 - 13,847ab + 6,901a + 15,68b^2 + 192b + 2581.$$

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено інтегровану модель оцінки безпеки залізничних переїздів, яка враховує не лише традиційні показники (частота аварій, інтенсивність руху), але й нові фактори, такі як надійність обладнання, людський фактор та вплив

зовнішніх умов. Запропонована модель дозволяє визначати більш точний прогноз ризиків та обирати оптимальні рішення щодо модернізації переїздів з урахуванням конкретних умов експлуатації.

Сформульовані рекомендації можуть бути використані для розробки ефективних програм модернізації залізничних переїздів в Україні.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Упровадження запропонованих технологій дозволить підвищити рівень безпеки руху на 20 % та зменшити середній час очікування на переїзді на 15 %. Крім того, це сприятиме підвищенню пропускної спроможності залізниць та зниженню витрат на утримання інфраструктури.

Висновки

Для зниження ризику людських помилок і підвищення рівня безпеки важливо впроваджувати сучасні технології та новітні розробки щодо ефективних рішень у сфері безпеки руху на залізничних переїздах. Особливу увагу варто приділити поширенню наявних рішень та активному впровадженню інновацій, наприклад: обладнання переїздів системами бар'єрного загороження (всього 8 на ділянках Укрзалізниці), встановлення відеоспостереження (лише 9 переїздів) і чотирьох шлагбаумів (всього 383 переїзди).

Необхідно вдосконалювати методику оцінки ризиків для розробки обґрунтованої стратегії управління переїздами. Під час оцінювання слід враховувати такі ключові фактори, як розташування переїзду (план, профіль, видимість), інтенсивність руху (залізничного, автомобільного та пішоходного), а також аналіз даних про аварії.

За допомогою методів ієрархій, мозкового штурму та інших інструментів доцільно визначати надійні показники для комплексної оцінки безпеки. Це охоплює всі аспекти проектування, будівництва, обслуговування та експлуатації залізничної інфраструктури, спрямовані на гарантування безпеки пасажирів і транспортних засобів.

Аналіз наведених даних вказує, що в Україні через відсутність обґрунтованої концепції вдосконалення системи безпеки залізничних переїздів пріоритети в розвитку цих підсистем відрізняються від пріоритетів розвинутих країн, що негативно впливає на ефективність функціонування небезпечних транспортних об'єктів – переїздів.

Реконструкція залізничних переїздів із застосуванням інноваційних технологій може суттєво поліпшити безпеку руху та створити умови для швидкісного руху поїздів. Серед таких технологій виділяють:

– системи автоматичного контролю та управління переїздами, які автоматично закривають

переїзд у разі наближення поїзда, запобігаючи зіткненням транспорту з рухомим складом залізниці;

– системи відеоспостереження, що дозволяють виявляти загрози, наприклад, перешкоди на переїзді або автомобілі, водії яких ігнорують заборонний сигнал;

– системи штучного інтелекту, здатні аналізувати дані з різних джерел (відеокамер, датчиків, метеостанцій) і приймати рішення щодо закриття переїзду в автоматичному режимі.

Упровадження таких технологій дає змогу скоротити час закриття переїздів, підвищити пропускну здатність залізниці, поліпшити видимість переїздів для водіїв, а також зменшити кількість аварій.

Окрім цього, важливим викликом є технічна несумісність української залізничної інфраструктури з європейськими стандартами. Рішенням може стати поступовий перехід на європейську колію, що забезпечить інтеграцію української залізниці до мережі ЄС. На маршрутах, де заплановано впровадження колії європейського стандарту, поточний стан переїздів часто не відповідає сучасним вимогам, тому необхідна їхня реконструкція.

Аналіз наукових досліджень і проведені розрахунки дозволили визначити ключові фактори, що впливають на ризики безпеки на переїздах, та окреслити інноваційні технології, які ефективно застосовуватимуть в мережі українських залізниць. Їх упровадження стане важливим кроком у гарантуванні безпеки руху, збереженні людських життів і сприятиме інтеграції в європейську транспортну систему.

Подяка

Дослідження, результати якого викладено в цій статті, проведено за підтримки гранту Національного фонду досліджень України в ході реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), отриманого в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Водяний А. ЄС розробив стратегію переходу України на євроколію 1435 мм. *LIGA.net*. 2023. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta>
2. Курган М. Б., Курган Д. М., Гусак М. А., Гаврилов М. О., Лужицький, О. Оцінка безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 2 (98). С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267978>
3. Курган М. Б., Лужицький О. Ф., Іванов Р. В., Хмелевська Н. П., Хмелевський В. С. Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 62–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191>
4. М 218-03450778-652:2008 *Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України*. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2008. 49 с.
5. ЦП-0174 *Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів*. Київ : Мін-во Юстиції України, 2007. 167 с.
6. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *Working Party on Rail Transport*. 50 p. URL: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/sc2/ECE-TRANS-SC2-2016-id05e.pdf>
7. Blagojević A, Kasalica S, Stević Ž, Tričković G, Pavelkić V. Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 2: P. 832–852. <https://doi.org/10.3390/su13020832>
8. Dezhkam B., Eslami S. M. A review of methods for highway-railway crossings safety management process. *International Electronic Journal of Mathematics Education*. 2017. Vol. 12. Iss. 3. P. 561–568. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/632>
9. Ishak S. Z., Yue W. L., Somenahalli S. An assessment of heavy vehicle safety at level crossing using Petri nets: South Australia case studies. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2011. Vol. 9. P. 1823–1838. DOI: <https://doi.org/10.11175/easts.9.1823>
10. Level Crossing Risk Assessment Guidance. *KiwiRail*. URL: <https://www.kiwirail.co.nz/assets/Uploads/documents/Level-Crossing-Risk-Assessment-Guidance.pdf>
11. Otto A., Kellermann P., Thieken A. H., Mániz Costa M., Carmona M., Bubeck P. Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. Vol. 33. P. 385–397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.025>
12. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail and Road*. URL: https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf
13. Read G. J. M., Cox J. A., Hulme A., Naweed A., Salmon P. M. What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. 2021. *Safety Science*. Vol. 138. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207>
14. Sekasi J., Solihu H. Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail. *Smart and Resilient Transportation*. 2021. Vol. 3. Iss. 3. P. 266–282. DOI: <https://doi.org/10.1108/srt-08-2021-0007>
15. Summary of the work of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2018-2019. *UN ESCAP*. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3807384?ln=en&v=pdf>
16. The Australian Level Crossing Assessment Model. *ALCAM in Detail. An Introduction to the new ALCAM models (2014)*. URL: <https://www.alcam.com.au/media/drt14t1f/alcam-in-detail-update-2016.pdf>
17. Turner S., Cook E., Boshier S. Level Crossing Safety Impact Assessments for Vehicle and Pedestrian Crossings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021. Vol. 2675. Iss. 9. P. 1482–1492. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211007857>

M. B. KURHAN¹, A. M. KURHAN², O. F. LUZHITSKYI^{3*}, R. V. IVANOV⁴,
N. P. KHMELEVSKA⁵,

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Dnipropetrovsk Scientific and Design Technological Bureau of Track Facilities, a branch of «NDCTI» JSC «Ukrzaliznytsia», tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

^{3*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

⁴Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

⁵Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail hmelevnela@gmail.com, ORCID 0000-0002-2360-8671

Modernization of Existing Level Crossings in the Areas of Construction of the European Standard Railway Track in Ukraine

Purpose. The article aims to analyze modern technological solutions to improve the level of safety at railway crossings, prevent emergencies and ensure uninterrupted traffic. **Methodology.** The study is based on the use of mathematical modeling and numerical methods to analyze the impact of modernization and new projects on the level of safety at railway crossings. Using computer modeling, mathematical models were built that reflect different scenarios of crossings. Based on the data obtained, the effectiveness of the proposed measures was assessed and recommendations for further optimization of the security system were developed. To evaluate the effectiveness of the proposed measures, a system of indicators has been developed to quantify the level of safety of railway crossings before and after modernization. These indicators take into account the daily intensity of train traffic through the crossing, the daily intensity of traffic on the road, the equipment of the crossing, the radius of the curve in the plan and the longitudinal slope of the road on the approaches to the crossing. **Findings.** An improvement of the method of the final accident rate, which is one of the most common tools for assessing traffic safety at railroad crossings, is proposed. The application of this method made it possible to quantify the level of risk of accidents and analyze the effectiveness of measures aimed at improving safety. The method is relatively easy to use and does not require complex mathematical calculations, and allows taking into account a wide range of factors affecting traffic safety at a level crossing, such as traffic volume, design features of the level crossing, availability of signaling, etc. The final coefficient was used to compare the safety level of different crossings and track the dynamics of changes in their equipment over time. This made it possible to identify crossings that require priority modernization, as well as to predict changes in the initial and calculated data and plan measures to introduce innovative technologies that improve traffic safety at crossings. **Originality.** An integrated model for assessing the safety of railroad crossings has been developed that takes into account not only traditional indicators (frequency of accidents, traffic intensity) but also new factors such as equipment reliability, human factor, and the impact of external conditions. The proposed model makes it possible to determine a more accurate risk forecast and choose optimal solutions for the modernization of level crossings, taking into account specific operating conditions. **Practical value.** The formulated recommendations can be used to develop effective programs for the modernization of railway crossings in Ukraine. The implementation of the proposed technologies will increase the level of traffic safety by 20% and reduce the average waiting time at a crossing by 15%. In addition, it will help to increase railroad capacity and reduce infrastructure maintenance costs.

Keywords: railway crossing; interoperability; modernization; combined track; road safety

REFERENCES

- Vodiany, A. (2023). EU developed a strategy for Ukraine's transition to European gauge 1435 mm. *LIGA.net*. Retrieved from <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta> (in Ukrainian)
- Kurhan, M. B., Luzhitskyi, O. F., Ivanov, R. V., & Khmelevskyi, V. S. (2024). Implementation of Innovative Technologies During the Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed Train Traffic. *Science and Transport Progress*, 1(105), 62-83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191> (in Ukrainian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

3. Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., Husak, M. A., Havrylov, M. O., & Luzhytskyi, O. F. (2022). Vehicle Traffic Safety Assessment at the Intersection of Highways and Railways at the Same Level. *Science and Transport Progress*, 2(98), 45-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267978> (in Ukrainian)
4. *Metodyka otsinky rivniv bezpeky rukhu na avtomobilnykh dorohakh Ukrainy, M 218-03450778-652:2008* (2008). Kyiv: State Road Service of Ukraine (Ukravtodor). (in Ukrainian)
5. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta ekspluatatsii zaliznychnykh pereizdiv, TsP-0174.* (2007). Kyiv: Ministry of Justice of Ukraine. (in Ukrainian)
6. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *Working Party on Rail Transport*. Retrieved from <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/sc2/ECE-TRANS-SC2-2016-id05e.pdf> (in English)
7. Blagojević, A., Kasalica, S., Stević, Ž., Tričković, G., & Pavelkić, V. (2021). Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 13(2), 832-852. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832> (in English)
8. Dezhkam, B., & Eslami, S. M. (2017). A review of methods for highway-railway crossings safety management process. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 12(3), 561-568. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/632> (in English)
9. Ishak, S. Z., Yue, W. L., & Somenahalli, S. (2011). An assessment of heavy vehicle safety at level crossing using Petri nets: South Australia case studies. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 9, 1823-1838. DOI: <https://doi.org/10.11175/easts.9.1823> (in English)
10. Level Crossing Risk Assessment Guidance. *KiwiRail*. Retrieved from <https://www.kiwirail.co.nz/assets/Uploads/documents/Level-Crossing-Risk-Assessment-Guidance.pdf> (in English)
11. Otto, A., Kellermann, P., Thieken, A. H., Mánuez Costa, M., Carmona, M., & Bubeck, P. (2019). Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 385-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.025> (in English)
12. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail and Road*. Retrieved from https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf (in English)
13. Read, G. J. M., Cox, J. A., Hulme, A., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2021). What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. *Safety Science*, 138, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207> (in English)
14. Sekasi, J., & Solihu, H. (2021). Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail. *Smart and Resilient Transportation*, 3(3), 266-282. DOI: <https://doi.org/10.1108/srt-08-2021-0007>
15. Summary of the work of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2018-2019. *UN. ESCAP*. Retrieved from <https://digitallibrary.un.org/record/3807384?ln=en&v=pdf> (in English)
16. The Australian Level Crossing Assessment Model. *ALCAM in Detail. An Introduction to the new ALCAM models (2014)*. Retrieved from <https://www.alcam.com.au/media/drtl4t1f/alcam-in-detail-update-2016.pdf> (in English)
17. Turner, S., Cook, E., & Bosher, S. (2021). Level Crossing Safety Impact Assessments for Vehicle and Pedestrian Crossings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675(9), 1482-1492. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211007857> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.08.2024

Прийнята до друку: 06.12.2024

УДК 625.032.5-048.34:[629.4.067:004.94]

Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА¹, М. Б. КУРГАН², Д. М. КУРГАН^{3*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, 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

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, 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

^{3*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, 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

Оптимізація виправлення кривих у плані за допомогою комп'ютерного моделювання для підвищення безпеки руху поїздів

Мета. Автори передбачають розробити та впровадити інноваційні підходи до оптимізації виправлення кривих у плані залізничних колій за допомогою комп'ютерного моделювання. Цей процес має на меті: підвищення безпеки руху; поліпшення плавності ходу, що підвищує комфорт пасажирів; усунення обмежень швидкості на кривих ділянках, що дозволяє скоротити час у дорозі та підвищити пропускну спроможність залізниць; зменшення витрат на обслуговування колії та ремонт рухомого складу. Застосування спеціального програмного забезпечення для симуляції різних сценаріїв руху поїздів по скоригованих кривих дозволить оцінити вплив структури поїздопоту на швидкість руху, динаміку рухомого складу та стан колії. **Методика.** Дослідження базується на теорії математичного моделювання та чисельних методах розрахунків. Для пошуку оптимального варіанту реконструкції залізничних ділянок лінію розглянуто як комплексну систему, яка складається з різних об'єктів інфраструктури. Ці об'єкти через незадовільний технічний стан можуть обмежувати швидкість руху на певних ділянках. Розв'язання цієї задачі є складним через взаємозалежність таких об'єктів: скорочення часу руху на окремій ділянці не є лінійним, а отримання точних результатів потребує проведення тягових розрахунків з урахуванням різних варіантів усунення обмежень швидкості. **Результати.** Запропоновано алгоритм розрахунків для оптимізації довгих ділянок залізничної колії. Алгоритм дозволяє враховувати бажаний напрямок зсувів у кривих, що значно полегшує процес оптимізації. Наведено приклад розрахунків за запропонованим алгоритмом, який демонструє ефективність підходу. **Наукова новизна.** Розв'язано науково-прикладну задачу оптимізації процесу корегування залізничних кривих у плані. Це сприяє підвищенню безпеки та швидкості руху поїздів завдяки впровадженню новітніх методів комп'ютерного моделювання. **Практична значимість.** Реалізація запропонованої технології оптимізації залізничного плану дозволить суттєво підвищити швидкість і безпеку руху поїздів, а також збільшити пропускну спроможність залізничних ліній. Це стане важливим кроком для інтеграції українських залізниць до європейської транспортної системи.

Ключові слова: однорядісна крива; складова крива; комп'ютерне моделювання; оптимізація кривих; система автоматизованого проектування

Вступ

Сучасне залізничне сполучення неможливо уявити без високих швидкостей як основи інноваційного розвитку залізниць. Згідно зі Стратегією розвитку залізничного транспорту України, впровадження швидкісного руху поїздів на території України дозволить створити єдину мережу швидкісних залізниць, що буде сприяти збільшенню кількості транзитних пасажирів на напрямках Євросоюз–Україна.

В Україні склалися умови, коли міжрегіональні швидкісні електропоїзди і вантажні вагони, парк яких критично зношений і які практично

розбивають верхню будову колії, експлуатують на одних і тих самих ділянках залізниць. Крім того, профіль колії на маршрутах Інтерсіті+ має велику кількість кривих і ділянок з обмеженням швидкості. Це призвело до того, що подальше її підвищення для міжрегіональних електропоїздів з урахуванням дотримання необхідних умов безпеки неможливе [3]. У результаті другий етап впровадження в Україні денних швидкісних пасажирських перевезень уже сьогодні багато в чому вичерпав свій потенціал для перспективного розвитку. Ця ситуація вимагає активізації роботи з підготовки до третього, найбільш витратного, але і найбільш ефективного етапу вдосконалення швидкісних перевезень. У статті [2]

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

констатовано, що «третій етап впровадження швидкісних пасажирських перевезень зі значним скороченням часу в дорозі на маршрутах InterCity+ вимагає використання рухомого складу з експлуатаційними швидкостями 200 км/год і вище з одночасним вдосконаленням залізничної інфраструктури верхньої будови колії та системи електрифікації з виділенням окремих ліній для швидкісного пасажирського сполучення і вантажного руху».

Проведений аналіз кривих показав, що з плином часу крива може видозмінюватися відносно початкового положення через певні причини. Перша – незбалансоване навантаження як на внутрішню, так і на зовнішню рейки внаслідок перевищення підвищення зовнішньої рейки на низьких швидкостях або дефіциту підвищення на високих швидкостях замість рівноважної швидкості, для якої було передбачено підвищення. Друга причина – вплив великих горизонтальних сил, що діють на рейки від поїздів. Горизонтальні сили змінюють обрис кривої, зменшуючи чи збільшуючи кривизну в окремих місцях, що призводить до зміни відцентрового прискорення і, як наслідок, порушує плавність руху поїздів. Таким чином, для відновлення плавного руху транспортних засобів на цих кривих стає необхідним виправлення кривої й корегування її параметрів [9].

Щоб провести виправлення кривих, необхідно мати достовірну інформацію про план залізниці. Це пов'язано з вимірюванням величин, що визначають геометрію залізничної колії. Так, у статті польських фахівців [13] запропоновано інноваційний метод визначення положення осі залізничної колії, який використовує приймачі Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

Якщо реальні характеристики плану лінії відрізняються від проектних, це може викликати або обмеження швидкості, або перевищення нормативів, що, у свою чергу, може призвести до зниження рівня безпеки та комфортності руху, до збільшення сил взаємодії між колесами рухомого складу та елементами верхньої будови колії. Унаслідок збільшення цих сил підвищується знос рейок та інших елементів верхньої будови колії, а також коліс та елементів рухомого складу, що встановлено дослідженнями авторів роботи [11].

Наукові дослідження за напрямками вдосконалення параметрів кривих, мінімізації зносу в кривих, перебудови кривих з метою підвищення швидкості виконують не один десяток років. Так, у роботі [8] враховані вимоги міжнародного стандарту, який встановлює правила та положення для безпечного перевезення вантажів по залізниці. Викладено теоретичні основи та технічні вимоги для підвищення швидкості до 160 км/год, висвітлено питання щодо використання програмного забезпечення для розрахунку швидкісного потенціалу на наявних кривих, подано методологію пошуку рішення для подальшого підвищення швидкості. Досліджено різні типи кривих: проста крива, складова, S-подібні криві, а також такі параметри, як мінімальна довжина прямої вставки, довжина перехідних кривих, величина зсуву в разі виправлення кривих.

Технічна система, яка дозволяє вирішувати задачі щодо оптимальної реконструкції кривих залізниць для збільшення швидкості руху поїздів при мінімальних інвестиціях, запропонована авторами в роботі [12]. Враховано комфортне перевезення пасажирів при збільшенні швидкості в кривих ділянках колії.

У роботі [5] розглянуто визначення горизонтальної кривизни залізничної колії. Метод заснований на зміні кутів нахилу рухомої хорди в декартовій системі координат. Шляхом оцінки впливу довжини хорди на отримані значення кривизни встановлено, що довжина хорди не відіграє суттєвої ролі у визначенні кривизни і не обмежує застосування цього методу. Водночас звернено увагу на точність визначення кривизни та її відповідність на ділянках перехідних кривих. Автор [6] вважає, що проблема визначення горизонтальної кривизни осі залізничної колії для отримання вихідних геометричних характеристик траси остаточно не вирішена, і пояснює це тим, що геометричні характеристики визначають за допомогою наближених методів.

Багато наукових праць присвячено обґрунтуванню виду перехідних кривих під час впровадження швидкісного руху поїздів. Так, у роботі [7] представлено новий вид перехідної кривої, адаптованої до експлуатаційних вимог, що діють на залізниці.

В [4] автори дослідили зміну ширини колії в кривих для кількох залізничних другорядних

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

і магістральних ліній Угорщини з низьким і високим обсягом перевезень. Зміну параметра ширини колії як функцію часу, що минув, аналізували на основі функцій розподілу шляхом обчислення.

Пошуки нових методів зйомки плану лінії й розрахунків виправлення кривих для постановки їх в проєктне положення продовжуються [10]. Найвні методи зйомки і розрахунку виправлення кривих мають ряд недоліків, які не дозволяють використовувати їх в умовах підвищених вимог до точності положення колії в плані, особливо в разі підвищення швидкості руху поїздів і впровадження інноваційних систем автоматизованого проєктування.

По-перше, практично всі методи засновані на оцінці кривизни наявної колії по коловій кривій, що проходить через три сусідні точки. Цей підхід застосовують під час виправлення кривих «методом згладжування», він призводить до погрешностей на ділянках, де змінюється кривизна.

По-друге, якщо зсуви в окремих точках розраховують через різницю евольвент наявної й проєктної колії, то в складних і довгих кривих це призводить до неприпустимих похибок. Якщо параметри проєктного варіанту використовують для проєктування, наприклад, другої головної колії, то похибки евольвентного підходу можуть призвести до порушення умов безпеки руху поїздів.

По-третє, під час призначення проєктного положення для складових кривих із проміжними перехідними кривими на графіку кривизни не враховують особливості влаштування радіодалької кривої.

По-четверте, під час розв'язання проєктних і розрахункових задач через складнощі або через відсутність математичних моделей наявне положення кривої замінюють однорадіусною кривою, відносно якої і виконують всі розрахунки, що в окремих випадках призводить до збільшення обсягів будівництва і навіть до порушення безпеки руху поїздів.

По-п'яте, практично всі наявні методи дозволяють розраховувати тільки локальні складові криві одного напрямку. Водночас практично неможливо на складних ділянках виділити під час зйомки прямі, що відокремлюють одну локальну криву від іншої.

По-шосте, прямі підходів до ділянки практично у всіх методах визначають першою й останньою парами знятих точок, що в окремих випадках не відповідає куту повороту кривої і не дозволяє згодом з'єднати між собою розраховані ділянки.

Огляд наукових робіт показує, що запропоновані різними авторами методи є корисними для реконструкції наявної залізниці, але вони можуть бути ефективними у визначених умовах експлуатації. Багато праць вітчизняних і закордонних фахівців присвячено оптимізації поодиноких чи складових кривих, їх параметрів (радіуса, перехідних кривих, підвищення зовнішньої рейки тощо), але питання оптимізації плану лінії довжиною в перегін чи декілька перегонів вивчене недостатньо.

Мета

Основна мета роботи – показати інноваційні технології під час оптимізації плану залізниці, запровадження яких в Україні дозволить досягти більш високого рівня безпеки, плавності й комфортабельності їзди.

Методика

Світовий досвід свідчить, що без впровадження інновацій неможливий ефективний розвиток залізничного транспорту. Серед відомих сьогодні інноваційних технологій можна назвати використання комп'ютерного моделювання залізничної колії, яке дозволяє визначити оптимальну стратегію плану лінії та забезпечити більш точну й ефективну роботу з виправлення кривих. У цій роботі акцент зроблено саме на використанні комп'ютерного моделювання.

Для знаходження варіанту оптимальної реконструкції ділянки транспортного коридору залізничну лінію розглядаємо як комплексну систему, що складається з пристроїв і споруд, які через незадовільний технічний стан можуть обмежувати рівень швидкостей руху поїздів на кожній конкретній ділянці. Вирішення такого завдання є складним, тому що необхідно розглядати взаємозалежні об'єкти, коли скорочення часу руху поїзда, отримане на кожному об'єкті, після усунення обмеження швидкості руху не дорівнює виграшу в часі, якщо зняти всі обме-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ження швидкості. Тобто критерій не є адитивним, і отримати достовірні дані можна тільки після виконання тягових розрахунків за різних комбінацій зняття обмежень швидкостей.

Інноваційний підхід у САПР полягає в тому, що, по-перше, передбачена можливість застосування різних способів зйомки плану лінії, які використовують як у колійному господарстві (метод стріл), так і в проєктних організаціях (метод Гонікберга, координатний, від базису тощо); по-друге, що дуже важливо, розрахунки виконують не окремих кривих, а ділянок довжиною в перегін чи кілька перегонів з оптимізацією проєктного плану за різними критеріями із забезпеченням максимально встановленої швидкості [1]. Для наявних методів проєктування плану поки ще не розроблено чіткої системи критеріїв оптимального положення проєктної кривої. Використання запропонованої в цій роботі методики дозволяє проводити оптимізацію проєктного плану за різними критеріями, а саме: мінімум суми модулів величин зсувів $\sum |\Delta_i| = \min$, мінімум суми квадратів зсувів $\sum \Delta_i^2 = \min$, мінімум суми витрат на рихтування кривих $\sum B = \min$, що дозволяє нівелювати вищенаведені зауваження.

Перші два критерії мають більш математичний сенс і орієнтовно гарантують мінімум робіт на виконання рихтування. Критерій у вигляді суми витрат дозволяє відшукати економічно виправдане рішення, але вимагає знання економічних показників для відповідних видів робіт.

За великої кількості обмежень доцільно спочатку проводити оптимізацію за сумою модулів і лише потім переходити до суми витрат. Витрати за третім критерієм визначено за формулою:

$$B = \sum_{i=1}^{i=4} a_i l_i + \sum_{i=5}^{i=7} a_i l_i + \sum_{i=8}^{i=10} a_i Q_i, \quad (1)$$

де $a_1 \dots a_4$ – витрати на зміщення осі наявної колії відповідно до $\Delta_1 \leq 60$ мм, $\Delta_2 = 61 \dots 120$ мм, $\Delta_3 = 121 \dots 250$ мм і $\Delta_4 > 250$ мм; $l_1 \dots l_4$ – довжина ділянок із відповідним діапазоном зсувів; $a_5 \dots a_7$ – витрати відповідно на перекладання верхньої будови колії, перенесення контактної мережі, пристроїв СЦБ; $l_5 \dots l_7$ – довжина ділянок перекла-

дання колії, перенесення контактної мережі, кабелів СЦБ; $a_8 \dots a_{10}$ – вартість 1 м^3 баласту, ґрунту для розширення наявного земляного полотна та ґрунту для відсіпання земляного полотна на новій трасі; $Q_8 \dots Q_{10}$ – об'єм баласту, ґрунту для розширення наявного земляного полотна та ґрунту для відсіпання нового земляного полотна.

Під час розрахунку довгих ділянок, що містять криві різних напрямків і проміжні прямі, у ряді випадків оптимізація проходить достатньо довго, а тому більш ефективно в такому разі розбити ділянку на частини, оптимізувати кожну з цих частин, а потім завантажити для всієї ділянки параметри моделі частинами й остаточно оптимізувати всю ділянку. Такий шлях виявляється значно швидшим, ніж оптимізація відразу всієї ділянки [8].

Наведемо алгоритм послідовності виконання розрахунків для оптимізації довгих ділянок:

1. Проводять координатну зйомку за параметрами кривих. Розбиття довгої ділянки на окремі частини виконують із використанням графіків кутових діаграм і кривизни ділянки. Таким чином формують вихідні набори даних (файли) для оптимізації.

2. Виконують оптимізацію кожної кривої в евольвентній або координатній моделях за одним із трьох критеріїв оптимізації: мінімум суми квадратів зсувів, модулів зсувів або за мінімумом витрат.

3. Після розрахунку кожного фрагмента поєднують зйомку окремих фрагментів для всієї ділянки. Під час поєднання елементів (крива – пряма, крива – крива) без перехідних кривих контролюють максимальну різницю кривизни цих елементів. Якщо різниця перевищує задану, змінюють значення радіусів так, щоб це обмеження виконувалося. У процесі оптимізації контролюють можливість відводу підвищення зовнішньої рейки

в межах перехідної кривої. Для ефективного з'єднання частин бажано провести округлення радіусів із фіксацією перехідних кривих наприкінці розрахунку кожної частини.

4. Виконують розрахунок і оцінку величини зсувів для всієї ділянки. Можливе врахування бажаного напрямку зсувів – «вправо», «вліво» або будь-яке. Величина обмеження і заданий зсув наприкінці ділянки враховують у будь-якому випадку, інші обмеження враховують

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

у процесі оптимізації. Також можна задати загальне обмеження на величину зсуву для всіх точок кривої.

5. Розраховують максимально допустимі швидкості руху для проектного варіанту і проводять аналіз результатів за прийнятим раніше критерієм.

Результати

Щоб показати інноваційні технології під час оптимізації плану залізниці, запровадження яких в Україні дозволить досягти більш високого рівня безпеки, плавності й комфортабельності їзди, застосовано систему автоматизованого проектування (САПР), яка містить програмні продукти MoveRW (тягові розрахунки) і RWPlan (виправлення і проектування плану залізничної колії). Приклад розрахунків за вищезазначеним алгоритмом наведено для напрямку Гребінка – Полтава – Лозова.

Проектне положення плану лінії визначено за умови реконструкції плану в такий спосіб, щоб, залишаючись у межах земляного полотна, отримати максимально можливу швидкість. Умовно було прийнято, що припустимими в цьому випадку будуть рихтування до 250 мм.

Остаточний висновок може бути зроблений тільки на основі координатної зйомки ділянки та детальних розрахунків із забезпеченням габаритів та міжколійя.

У результаті розрахунків плану та тягових розрахунків отримано дані для наступних варіантів.

Варіант 1, початковий. Станції та план колії не змінюються.

Варіант 2. Виконують реконструкцію станцій із метою підвищення швидкостей руху, план колії не змінюється.

Варіант 3. Окрім реконструкції станцій, у кривих змінюють підвищення таким чином, щоб забезпечити максимально можливі швидкості з мінімальним зносом рейок; при цьому положення колії в плані, радіуси та довжини перехідних кривих не змінюються.

Варіант 4. Крім реконструкції станцій, під час виконання робіт колію укладають у нове проектне положення, що забезпечує максимально можливі швидкості з мінімальним зносом рейок, при цьому колія залишається в межах наявного земляного полотна.

Оскільки час руху поїздів типу Hyundai мало відрізняється за напрямками, у табл. 1 наведено час лише в прямому напрямку.

Таблиця 1

Час руху поїздів Hyundai у прямому напрямку за варіантами

Table 1

Travel time of Hyundai trains in the forward direction by options

Ділянка	Довжина, км	Час руху поїздів Hyundai за варіантами, хв			
		1	2	3	4
Гребінка – Миргород	98,4	61	53	49	47
Миргород – Полтава	87,8	73	65	65	61
Гребінка – Полтава	186,2	134	118	114	108
Полтава – Берестин	80,2	68	64	51	48
Берестин – Лозова	95,3	70	61	56	51
Полтава – Лозова	17,5	138	125	107	99
Гребінка – Лозова	361,7	272	243	221	207

Як видно з результатів, на ділянці Гребінка – Полтава реконструкція станцій дає суттєвий ефект (16 хв). Встановлення підвищення зовнішньої рейки, розрахованого відповідно до нор-

мативів, дозволяє заощадити ще 4 хвилини. Укладання колії в проектне положення за розрахунком дає 10 хв економії часу порівняно з варіантом 2. На ділянці Полтава – Лозова реконструкція станцій дає відносно невеликий ефект (7 хв).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Водночас за рахунок коригування підвищення зовнішньої рейки (варіант 3) вдається заощадити ще 18 хв. Укладання колії в проектне положення (варіант 4) дає значне скорочення часу (26 хв) порівняно з варіантом 2.

Під час розрахунку проектного варіанту для кожної кривої досліджено доцільність та можливість підвищення швидкості на ній. При цьому

розглянуто варіанти, які потребують рихтувань у межах основної площадки земляного полотна. Фрагменти графіків кривизни, зсувів та максимально допустимих швидкостей руху поїздів на ділянці Полтава – Берестин для проектного варіанту наведені на рис. 1–3.

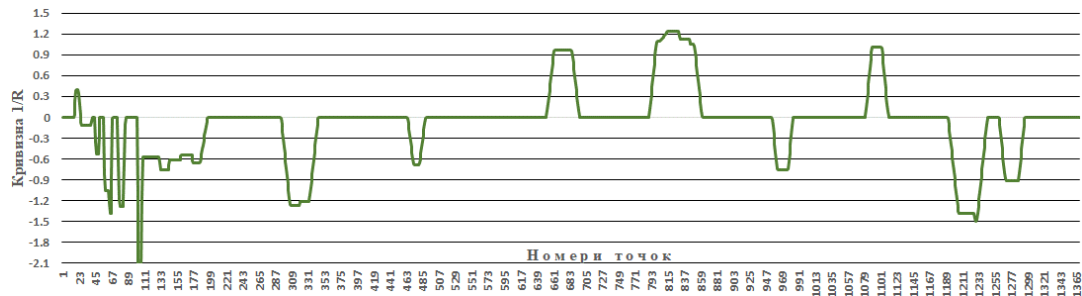


Рис. 1. Кривизна плану лінії на ділянці Полтава – Берестин (фрагмент)

Fig. 1. Curvature of the line plan on the Poltava – Berestyn section (fragment)

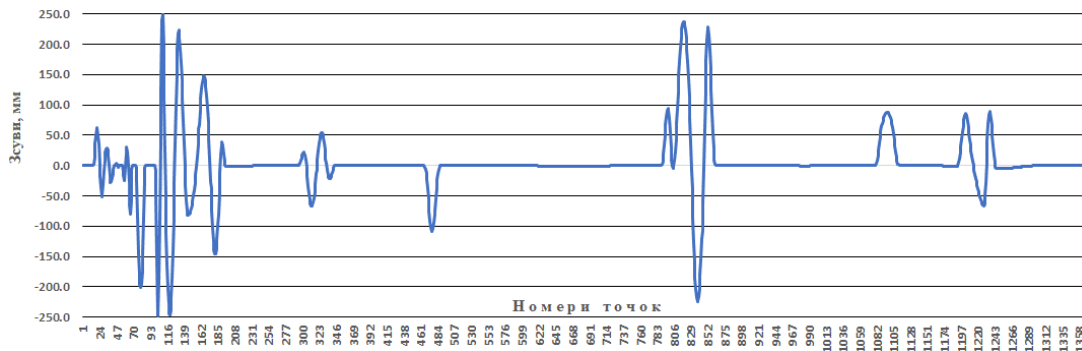


Рис. 2. Зсуви кривих на ділянці Полтава – Берестин

Fig. 2. Curve shifts on the Poltava – Berestyn section

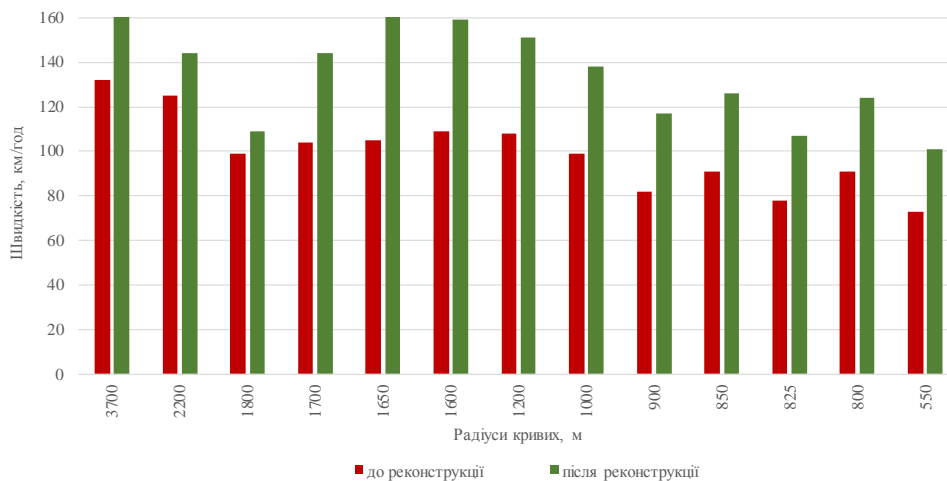


Рис. 3. Допустимі швидкості руху на ділянці Полтава – Берестин

Fig. 3. Permissible speeds on the section Poltava – Berestyn

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

За результатом оптимізації підвищення зовнішньої рейки з урахуванням максимально допустимої швидкості й зносу рейок вдалося отримати оптимальне рішення. У всіх варіантах прискорення вантажних поїздів не перевищують $0,3 \text{ м/с}^2$.

Наукова новизна та практична значимість

Розв'язано науково-прикладну задачу оптимізації процесу корегування залізничних кривих у плані. Це сприяє підвищенню безпеки та швидкості руху поїздів завдяки впровадженню новітніх методів комп'ютерного моделювання. Реалізація запропонованої технології оптимізації залізничного плану дозволить суттєво підвищити швидкість і безпеку руху поїздів, а також збільшити пропускну спроможність залізничних ліній. Це стане важливим кроком для інтеграції українських залізниць до європейської транспортної системи.

Висновки

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що застосування інноваційних технологій із використанням комп'ютерного моделювання залізничної колії виправлення залізничних кривих дозволяє встановлювати раціональні параметри

плану й швидкості руху поїздів, що дасть змогу зменшити знос рейок і коліс рухомого складу, обсяги робіт із поточного утримання колії, скоротити витрати електроенергії або палива під час організації перевезень вантажів і пасажирів, буде сприяти підвищенню рівня безпеки, плавності руху й комфорту пасажирів.

Результати розрахунків і розроблена методика використання комп'ютерного моделювання виправлення залізничних кривих можуть бути використані для теоретичного обґрунтування максимально допустимих швидкостей руху поїздів з одночасним забезпеченням критеріїв міцності, стійкості, довговічності й надійності елементів залізничної колії та рухомого складу, а також для підвищення безпеки руху поїздів на залізницях України.

Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проведено за підтримки гранту Національного фонду досліджень України під час реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корженевич І. П. *Виправлення і проектування плану залізничної колії за допомогою програми RWPlan*. Дніпропетровськ, 2012. 247 с.
2. Приходько В. Особливості розвитку вітчизняного денного швидкісного руху. *Вагонний парк*. 2020. № 11 (163). С. 9–27.
3. Ткаченко В., Сапронова С., Брайковська Н., Твердомед В. *Динамічна взаємодія рухомого складу і колії на лініях швидкісного руху суміщеного з вантажним*: монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 240 с.
4. Fischer S., Németh D., Horváth H. Investigation of the Track Gauge in Curved Sections, Considering Hungarian Railway Lines. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8. Iss. 4. P. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8040069>
5. Koc W. Analysis of the Effectiveness of Determining the Horizontal Curvature of a Track Axis Using a Moving Chord. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*. Vol. 65. Iss. 190. P. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.36137/1902E>
6. Koc W. Estimation of the Horizontal Curvature of the Railway Track Axis with the Use of a Moving Chord Based on Geodetic Measurements. *Journal of Surveying Engineering*. 2022. Vol. 148, No. 4. P. 04022007-1–04022007-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000402](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000402)
7. Koc W. New Transition Curve Adapted to Railway Operational Requirements. *Journal of Surveying Engineering*. 2019. Vol. 145, No. 3. P. 04019009-1–04019009-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000284](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000284)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

8. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2024. Vol. 21, No. 1. P. 207–220.
DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.21.1.2024.1.13>
9. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. Maintenance Reliability of Railway Curves Using Their Design Parameters. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19 (6). P. 115–127.
DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.19.6.2022.6.9>
10. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. Innovative Technologies for the Introduction of High-Speed Train Operation (on the Example of Track Maintenance in the Plan). *Transport Means: Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (Kaunas, 05–07 Oct., 2022). Kaunas, 2022. Pt. I. P. 372–377.
11. Kurhan M., Kurhan D., Novik R., Baydak S., Hmelevska N. Improvement of the railway track efficiency by minimizing the rail wear in curves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012001>
12. Lebid I., Kravchenya I., Dubrovskaya T., Luzhanska N., Berezovyi M., Demchenko Y. Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929405003>
13. Wilk A., Koc, W., Specht C., Skibicki J., Judek S., Karwowski K., ... Grulkowski S. Innovative mobile method to determine railway track axis position in global coordinate system using position measurements performed with GNSS and fixed base of the measuring vehicle. *Measurement*. 2021. Vol. 175. P. 109016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109016>

N. P. KHMELEVSKA¹, M. B. KURHAN², D. M. KURHAN^{3*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail n.p.hmelevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2360-8671

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709

^{3*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail d.m.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9448-5269

Optimization of Curve Correction in the Plan Using Computer Modeling to Improve Train Safety

Purpose. The authors intend to develop and implement innovative approaches to optimizing curve correction in the plan of railway tracks using computer modeling. This process aims to: improve traffic safety; improve the smoothness of the ride, which increases passenger comfort; eliminate speed limits on curved sections, which reduces travel time and increases railroad capacity; reduce track maintenance and rolling stock repair costs. The use of special software to simulate various scenarios of train traffic along the adjusted curves will allow us to assess the impact of the train flow structure on the speed, rolling stock dynamics, and track condition. **Methodology.** The study is based on the theory of mathematical modeling and numerical calculation methods. To find the best option for the reconstruction of railway sections, the line is considered as a complex system consisting of various infrastructure facilities. Due to their unsatisfactory technical condition, these facilities may limit the speed of traffic on certain sections. The solution to this problem is complicated due to the interdependence of such objects: the reduction of travel time on a particular section is not linear, and obtaining accurate results requires traction calculations taking into account various options for eliminating speed limits. **Findings.** A calculation algorithm for optimizing long sections of the railway plan is proposed. The algorithm allows to take into account the desired direction of shifts in the curves, which greatly facilitates the optimization process. An example of calculations based on the proposed algorithm is given, which demonstrates the effectiveness of the approach. **Originality.** The scientific and applied problem of optimizing the process of adjusting railway curves in the plan has been solved. This helps to improve the safety and speed of trains through the introduction of the latest computer modeling methods. **Practical value.** The implementation of the proposed technology for optimizing the railway plan will significantly increase the speed and safety of train traffic, as well as increase the throughput capacity of railway lines. This will be an important step for the integration of Ukrainian railways into the European transportation system.

Keywords: single-radius curve; compound curve; computer modeling; curve optimization; computer-aided design system

REFERENCES

1. Korzhenevych, I. P. (2012). *Vypravlennia i proektuvannia planu zaliznychoi kolii za dopomohoiu prohramy RWPlan*. Dnipro. (in Ukrainian)
2. Prykhodko, V. (2020). Osoblyvosti rozvytku vitchyznianoho dennoho shvydkisnoho rukhu. *Vahonnyi park*, 11(163), 9-27. (in Ukrainian)
3. Tkachenko, V., Saponova, S., Braikovska, N., & Tverdomed, V. (2021). *Dynamichna vzaiemodiia rukhomoho skladu i kolii na liniakh shvydkisnoho rukhu sumishchenoho z vantazhnym: monohrafiia*. Vinnytsia: HO «Yevropeiska naukova platforma». (in Ukrainian)
4. Fischer, S., Németh, D., & Horváth, H. (2023). Investigation of the Track Gauge in Curved Sections, Considering Hungarian Railway Lines. *Infrastructures*, 8(4), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8040069> (in English)
5. Кос, В. (2021). Analysis of the Effectiveness of Determining the Horizontal Curvature of a Track Axis Using a Moving Chord. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*, 65(190), 85-95. DOI: <https://doi.org/10.36137/1902e> (in English)
6. Кос, В. (2022). Estimation of the Horizontal Curvature of the Railway Track Axis with the Use of a Moving Chord Based on Geodetic Measurements. *Journal of Surveying Engineering*, 148(4), 04022007-1-04022007-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000402](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000402) (in English)
7. Кос, В. (2019). New Transition Curve Adapted to Railway Operational Requirements. *Journal of Surveying Engineering*, 145(3), 04019009-1-04019009-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000284](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000284) (in English)
8. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2024). Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(1), 207-220. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.21.1.2024.1.13> (in English)
9. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2022). Maintenance Reliability of Railway Curves Using Their Design Parameters. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(6), 115-127. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.19.6.2022.6.9> (in English)
10. Kurhan, M., Kurhan, D., Husak, M., & Hmelevska, N. (2022, Oct.). Innovative technologies for the introduction of high-speed train operation (on the example of track maintenance in the plan). In *Transport Means: Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (Pt. I, pp. 372–377).
11. Kurhan, M., Kurhan, D., Novik, R., Baydak, S., & Hmelevska, N. (2020). Improvement of the railway track efficiency by minimizing the rail wear in curves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985(1), 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012001> (in English)
12. Lebid, I., Kravchenya, I., Dubrovskaya, T., Luzhanska, N., Berezovyi, M., & Demchenko, Y. (2019). Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines. *MATEC Web of Conferences*, 294, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929405003> (in English)
13. Wilk, A., Кос, В., Specht, C., Skibicki, J., Judek, S., Karwowski, K., ... & Grulkowski, S. (2021). Innovative mobile method to determine railway track axis position in global coordinate system using position measurements performed with GNSS and fixed base of the measuring vehicle. *Measurement*, 175, 109016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109016> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.07.2024

Прийнята до друку: 02.12.2024

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.423.016.5:519.87

А. Я. КУЗИШИН^{1*}, В. В. КОВАЛЬЧУК³, Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА⁴

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

²Львівський НДІ судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

³Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта vitalii.v.kovalchuk@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-4350-1756

⁴Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта yuliiia.h.sobolevska@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8087-2014

Просторова математична модель динамічної поведінки сучасного рухомого складу в умовах швидкісного руху

Мета. У роботі передбачено розробити просторову математичну модель швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан» із врахуванням конструкційних особливостей його першого та другого ступенів ресорного підвішування. **Методика.** Узятю розрахункову схему електропоїзда як сукупність 7 твердих тіл, з'єднаних в'язями різної реології. Кожне з тіл здійснює просторові коливання. При цьому колісну пару розглянуто як систему з двома ступенями вільності (боковий винос та виляння). Як узагальнені координати розглянуто кутові та лінійні переміщення тіл. Отримана механічна система має 26 ступенів вільності. Диференціальні рівняння руху записано за допомогою принципу д'Аламбера. Розглянуто кінематичне збурення коливань унаслідок руху по нерівностях колії як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. У першому та другому ступенях ресорного підвішування враховано наявність пружних і дисипативних в'язей. Прийнято гіпотезу геометричної лінійності деформацій. У місці контакту колеса та рейки враховано реакції, що діють у поздовжньому (у площині колеса) та в поперечному напрямках. Кількісно поздовжні та поперечні реакції описують нелінійною гіпотезою крипу. Під час моделювання гідравлічних гасників коливань враховано їх похиле розташування, що дає можливість демпфувати коливання у вертикальному та горизонтальному напрямках. **Результати.** Обрано просторову розрахункову схему досліджуваного об'єкта. Отримано геометричні залежності між деформаціями в'язей та узагальненими координатами розрахункової схеми. Описано фізичні залежності між реакціями в'язей та їх деформаціями, із врахуванням пневматичної системи ресорного підвішування. Складено диференціальні рівняння коливань для кожного елемента розрахункової схеми. **Наукова новизна.** Уперше побудовано просторову математичну модель динамічної поведінки швидкісного рухомого складу залізниці з урахуванням особливостей роботи пневматичної системи ресорного підвішування, розташування в'язей та взаємодії колісної пари з рейковою колією у вертикальному та горизонтальному напрямках як у прямих, так і в кривих ділянках залізничної колії. **Практична значимість.** Розробка такої моделі дозволить на етапі проектування швидкісного рухомого складу залізниці чисельно досліджувати його динамічні показники та показники безпеки руху в умовах швидкісного руху та встановлювати оптимальні параметри в'язей першого та другого ступенів ресорного підвішування, задаючи при цьому різного роду кінематичні збурення з боку рейкової колії.

Ключові слова: швидкісний рухомий склад; математична модель; рейкова колія; конструктивні в'язі; коливання; дисипація

Вступ

Із 2012 року на залізницях України у внутрішньому сполученні почали експлуатувати швидкісні електропоїзди HRCS–2 виробництва компанії «Hyundai Rotem» (рис. 1) та електропоїзди ЕКр–1 «Тарпан» (рис. 2) вітчизняного виробника – ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод». Ці електропоїзди експлуатують зі швидкістю до 160 км/год, хоча конструктивно електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан» може рухатися зі швидкістю до 200 км/год.

Основною умовою безпечної експлуатації цих електропоїздів в умовах швидкісного руху, а саме за швидкості від 160 до 250 км/год, є забезпечення допустимого рівня динамічних показників та показників безпеки руху [1, 8].



Рис. 1. Швидкісний електропоїзд HRCS–2

Fig. 1. High-speed electric train HRCS–2



Рис. 2. Швидкісний електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 2. High-speed electric train ЕКр–1 «Тарпан»

Ці величини головним чином залежать від конструкційних особливостей першого та другого ступеня ресорного підвішування – застосування пневматичної системи ресорного підвішування, комплектів витих циліндричних пружин та гідравлічних гасників коливань (рис. 3), а також умов взаємодії колісної пари з рейковою колією [2–5, 12].

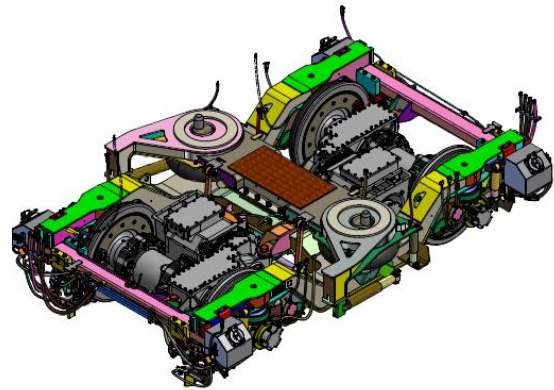


Рис. 3. Привідний візок швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 3. Drive bogie of the high-speed electric train ЕКр–1 «Тарпан»

Нерівності та конструкційні особливості рейкової колії (стики, стрілочні переводи тощо) є основним збудувальним фактором виникнення коливань елементів рухомого складу в процесі його експлуатації [6, 7, 13, 14]. Залежно від природи утворення нерівності можуть бути як локальними, так і регулярними.

Отже, дослідження динамічної поведінки сучасного рухомого складу в діапазоні швидкостей 160÷250 км/год з урахуванням конструкційних особливостей його механічної частини та умов взаємодії з рейковою колією є актуальною науковою задачею. Використання адекватної та адаптованої математичної моделі дозволить ще на стадії проектування швидкісного рухомого складу визначити динамічні показники та показники безпеки руху, а також обирати оптимальні параметри основних вузлів та деталей екіпажної частини.

Мета

Основною метою роботи є розробка просторової математичної моделі швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» із врахуванням конструкційних особливостей першого та другого ступенів ресорного підвішування та умов взаємодії з рейковою колією.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати такі завдання:

1. Вибрати розрахункову схему електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан».

2. Описати фізичні залежності між реакціями в'язей і узагальненими координатами розрахункової схеми.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Скласти систему диференціальних рівнянь руху.

4. Перевірити працездатність розробленої математичної моделі.

Методика

Динамічні сили, що виникають під час руху вагона у складі електропоїзда, відхилення від положення рівноваги, інерційні навантаження, що діють на пасажирів, є наслідком коливальних процесів та інших видів нерівномірного руху інерційних мас, що складають механічну систему. Величини та частоти коливань у першу чергу визначають динамічні якості вагона: плавність руху, стійкість та безпеку рухомого складу, а також рівень сил, які виникають у процесі руху, та від яких залежить міцність елементів вагона й залізничної колії.

Узагальнені координати механічної системи, що описує рух електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан», обирають як лінійні переміщення центрів мас кожного з тіл, а також кутові переміщення відносно головних центральних осей. Основними видами коливань є:

– для поступального руху: підстрибування (за напрямком осі z), посмикування (за напрямком осі x) та боковий винос (за напрямком осі y);

– для обертового руху: галопування (навколо осі y), виляння (навколо осі z) та бокове хитання (навколо осі x).

Для обраної розрахункової схеми (рис. 4) та узагальнених координат диференціальні рівняння коливань записують за методом д'Аламбера. Для цього рекомендовано виконати таку послідовність дій:

– із геометричних співвідношень скласти залежності переміщень (деформацій) в'язей від заданих можливих (або віртуальних) переміщень системи;

– відповідно до фізичних законів виразити реакції в'язей, сили інерції що діють на аналізовані тіла системи, та моменти сил інерції через деформації, їх швидкості та прискорення;

– замінити фізичну модель (розрахункову схему) силовою схемою та скласти для неї рівняння рівноваги під дією прикладених активних сил та сил інерції.

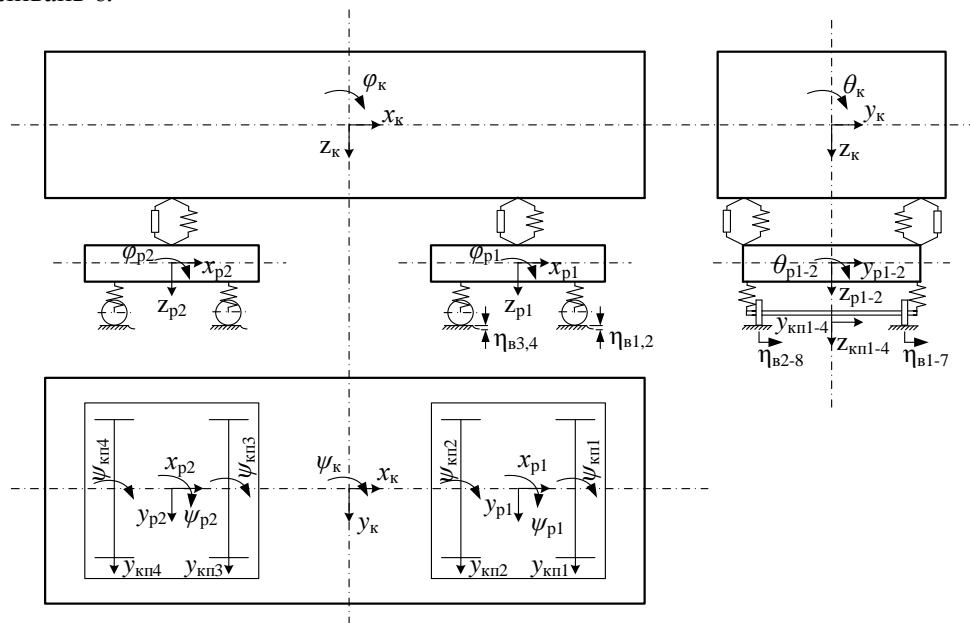


Рис. 4. Розрахункова схема вагона швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 4. Design scheme of the car of the high-speed electric train EKr–1 «Tarpan»

Отже, як бачимо з наведеної на рис. 4 розрахункової схеми вагона, його стан у будь-який момент часу визначають 26 координатами, де:

$x_k, y_k, z_k, \theta_k, \varphi_k, \psi_k$ – координати кузова; $x_{p1}, y_{p1},$

$z_{p1}, \theta_{p1}, \varphi_{p1}, \psi_{p1}$ – координати рами візка № 1;

$x_{p2}, y_{p2}, z_{p2}, \theta_{p2}, \varphi_{p2}, \psi_{p2}$ – координати рами візка

№ 2; $y_{kn1}, \psi_{kn1}, y_{kn2}, \psi_{kn2}$ – координати колісних

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

пар візка № 1; $y_{кп3}, \psi_{кп3}, y_{кп4}, \psi_{кп4}$ – координати колісних пар візка № 2.

Слід звернути увагу на прийняте припущення про нерозривність контакту між колесом та рейкою. У такому випадку рух колісної пари у вертикальному напрямку по осі z та її бокове хитання (навколо осі x) буде повторювати прийняті геометричні нерівності лівої і правої рейки. Крім цього, унаслідок в'язей, накладених на рух колісних пар, їх переміщення у поздовжньому напрямку будуть збігатися з переміщеннями відповідного візка. Також будуть відсутні коливання галопування. Це дозволяє розглянути кожну колісну пару як систему з двома ступенями вільності (боковий винос і коливання виляння) та зменшити загальну кількість ступенів вільності системи.

Застосовуючи принцип д'Аламбера, відкидаємо в'язі, замінюючи їх реакціями (рис. 5–7).

Прикладаємо сили інерції та моменти сил інерції. Для кожного моменту часу прописуємо рівняння рівноваги тіл системи.

Отже, для кузова диференціальні рівняння матимуть вигляд:

– підстрибування:

$$m_k \ddot{z}_k + \sum_{j=1}^4 P_j + \sum_{j=1}^4 P_{в.винj} + \sum_{j=1}^4 P_{вj} - m_k g = 0; \quad (1)$$

– посмикування:

$$m_k \ddot{x}_k + \sum_{j=1}^4 F_j + \sum_{j=1}^4 P_{п.вj} = 0; \quad (2)$$

– боковий винос:

$$m_k \ddot{y}_k + \sum_{j=1}^4 Q_j + \sum_{j=1}^4 P_{у.вj} + \sum_{j=1}^4 P_{г.винj} = 0; \quad (3)$$

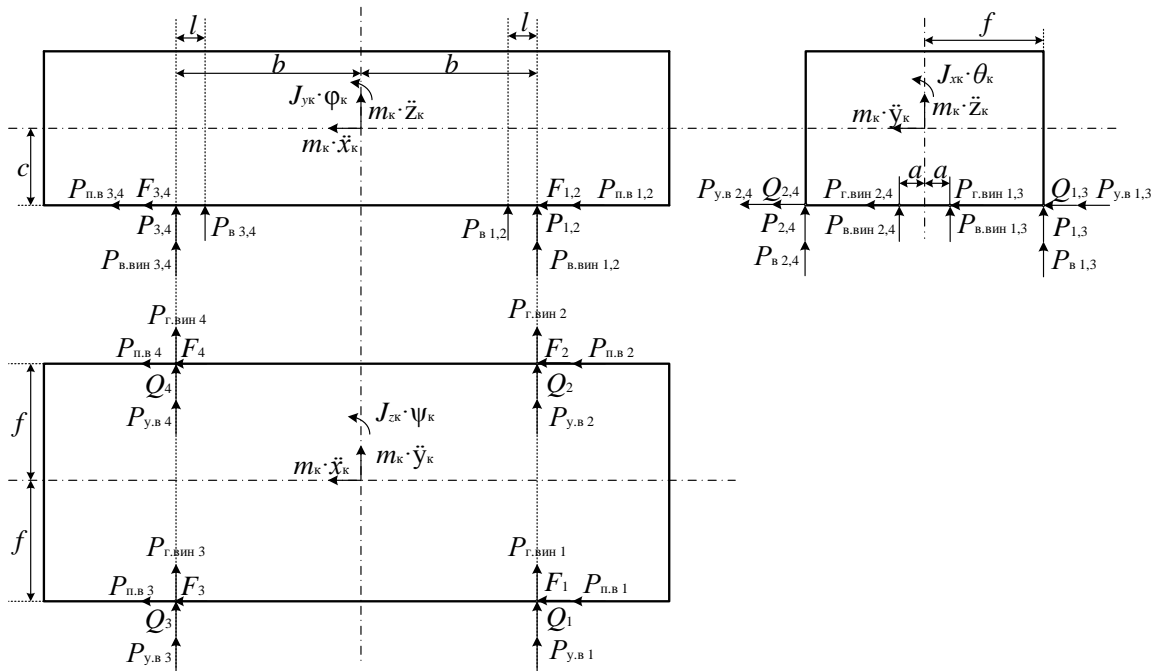


Рис. 5. Схема дії сил на кузов вагона швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 5. Scheme of the action of forces on the car body of the high-speed electric train ЕКр–1 «Tarpan»

– бокове хитання:

$$J_{зк} \ddot{\theta}_k + P_1 f - P_2 f + P_3 f - P_4 f + P_{в1} f - P_{в2} f + P_{в3} f - P_{в4} f + \\ + P_{в.вин1} a - P_{в.вин2} a + P_{в.вин3} a - P_{в.вин4} a - \sum_{j=1}^4 Q_j c - \sum_{j=1}^4 P_{у.вj} c - \sum_{j=1}^4 P_{г.винj} c = 0; \quad (4)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для рами візка № 1 диференціальні рівняння рівноваги матимуть вигляд:
– підстрибування:

$$m_{p1}\ddot{z}_{p1} - P_1 - P_2 - P_{v1} - P_{v2} - P_{v.vин1} - P_{v.vин2} + \sum_{j=1}^4 P_{пj} + \sum_{j=1}^4 P_{гj} = 0; \quad (7)$$

– посмикування:

$$m_{p1}\ddot{x}_{p1} - F_1 - F_2 - P_{п.v1} - P_{п.v2} + \sum_{j=1}^4 P_{пxj} = 0; \quad (8)$$

– боковий винос:

$$m_{p1}\ddot{y}_{p1} - Q_1 - Q_2 - P_{y.v1} - P_{y.v2} - P_{г.vин1} - P_{г.vин2} + \sum_{j=1}^4 P_{пгj} = 0; \quad (9)$$

– галопування:

$$J_{xp1}\ddot{\phi}_{p1} + P_{v1}l + P_{v2}l + P_{п1}\varepsilon + P_{п2}\varepsilon - P_{п3}\varepsilon - P_{п4}\varepsilon + P_{г1}e + P_{г2}e - P_{г3}e - P_{г4}e - \\ - F_1h - F_2h + P_{пx1}w + P_{пx2}w + P_{пx3}w + P_{пx4}w = 0; \quad (10)$$

– виляння:

$$J_{zp1}\ddot{\psi}_{p1} + P_{пг1}\varepsilon + P_{пг2}\varepsilon - P_{пг3}\varepsilon - P_{пг4}\varepsilon + F_1f - F_2f + \\ + P_{п.v1}f - P_{п.v2}f - P_{пx1}f + P_{пx2}f - P_{пx3}f + P_{пx4}f = 0; \quad (11)$$

– бокове хитання:

$$J_{xp1}\ddot{\theta}_{p1} - P_{v.vин1}a + P_{v.vин2}a - P_1f + P_2f - P_{v1}f + P_{v2}f + P_{п1}f - P_{п2}f + P_{п3}f - P_{п4}f + \\ + P_{г1}f - P_{г2}f + P_{г3}f - P_{г4}f + P_{г.vин1}h + P_{г.vин2}h - Q_1h - Q_2h + P_{пг1}w + P_{пг2}w + P_{пг3}w + P_{пг4}w = 0, \quad (12)$$

де m_p – маса рами візка; J_{xp}, J_{yp}, J_{zp} – моменти інерції рами візка відносно центральних осей x, y, z ; $P_{пj}$ – вертикальні реакції пружин буксового ступеня ресорного підвішування; $P_{пxj}$ – поздовжні реакції пружин буксового ступеня ресорного підвішування; $P_{пгj}$ – поперечні реакції пружин буксового ступеня ресорного підвішування; $P_{гj}$ – вертикальні реакції гідравлічних гасників коливань буксового ступеня ресорного підвішування; h – відстань по вертикалі від центра ваги рами візка до пневматичної ресори; w – відстань по вертикалі від центра ваги рами візка до

площини спирання на пружини буксового підвішування; ε – відстань по осі x від центра ваги рами візка до центрів пружин буксового ресорного підвішування; e – відстань по осі x від центра ваги рами візка до точки прикладання вертикальної реакції вертикальних гідравлічних гасників коливань буксового ресорного підвішування.

Для другої рами візка швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» диференціальні рівняння рівноваги матимуть ідентичний вигляд, однак з іншими індексами.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

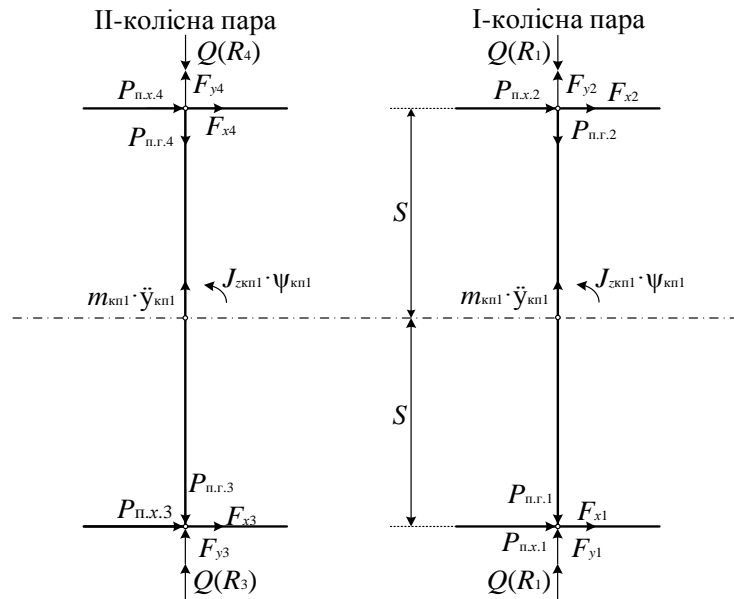


Рис. 7. Схема дії сил на колісні пари першого візка вагона швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 7. Diagram of the action of forces on the wheel pairs of the first bogie of the EKr–1 «Tarpan» high-speed electric train

Для колісних пар № 1–2 візка № 1 диференціальні рівняння рівноваги матимуть вигляд:

– боковий винос:

$$m_{\text{кп1}} \ddot{y}_{\text{кп1}} + F_{y1} + F_{y2} + Q(R_1) - Q(R_2) - P_{\text{пг1}} - P_{\text{пг2}} = 0; \quad (13)$$

$$m_{\text{кп2}} \ddot{y}_{\text{кп2}} + F_{y3} + F_{y4} + Q(R_3) - Q(R_4) - P_{\text{пг3}} - P_{\text{пг4}} = 0; \quad (14)$$

– вилання:

$$J_{\text{зкп1}} \ddot{\Psi}_{\text{кп1}} + F_{x1} S - F_{x2} S + P_{\text{пх1}} S - P_{\text{пх2}} S = 0; \quad (15)$$

$$J_{\text{зкп2}} \ddot{\Psi}_{\text{кп2}} + F_{x3} S - F_{x4} S + P_{\text{пх3}} S - P_{\text{пх4}} S = 0, \quad (16)$$

де $m_{\text{кп}}$ – маса колісної пари; $J_{\text{зкп}}$ – осьовий момент інерції колісної пари відносно осі z ; S – відстань від точки контакту колеса і рейки до центра ваги колісної пари; F_x – поздовжні реакції в контакті колеса і рейки; F_y – поперечні реакції в контакті колеса і рейки; $Q(R)$ – проекції на горизонтальну вісь у сил взаємодії колеса і рейки.

У взятій розрахунковій схемі швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан», крім комплектів кручених циліндричних пружин (перший ступінь ресорного підвішування), застосовують гідравлічні гасники коливань (перший та другий ступінь) та пневматичні ресори (другий ступінь).

Для опису реакцій крученої циліндричної пружини застосовуємо закон Гука:

$$P_{ij} = -k \Delta z_{ij}, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт жорсткості; Δz_{ij} – деформація пружини.

Для знаходження сили опору гідравлічного гасника коливань беремо, що вона пропорційна швидкості переміщення штоку:

$$P_{ij} = \beta \dot{\Delta z}_{\text{шт}}, \quad (18)$$

де β – коефіцієнт демпфування гідравлічного гасника коливань; $\dot{\Delta z}_{\text{шт}}$ – швидкість переміщення штока гідравлічного гасника коливань.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для знаходження вертикальних реакцій пневматичних ресор використовуємо залежність:

$$P_j = A_j \cdot P_j, \quad (19)$$

де A_j – ефективна площа j -ої пневматичної ресори; P_j – внутрішній тиск j -ої пневматичної ресори.

Для знаходження зміни внутрішнього тиску в пневматичній системі ресорного підвішування було використано термодинамічну модель з урахуванням геометричних параметрів з'єднувального трубопроводу, втрати напору внаслідок перетікання повітря між пневматичною ресорою та додатковим резервуаром [11]:

$$\dot{P}(t) = -\dot{h}(t) \frac{P(t)}{h(t)} + \dot{m}(t) \frac{RT(t)}{h(t)A_1} + \dot{T}(t) \frac{m(t)R}{h(t)A_1}, \quad (20)$$

де m – маса повітря, кг; R – універсальна газова стала, Дж/(кг·К); h – поточна висота пневматичної ресори, м; A_1 – ефективна площа пневматичної ресори, м²; P , V , T – тиск, об'єм та температура робочого тіла пневматичної ресори, Па, м³, К відповідно.

Враховано, що в процесі експлуатації зі зміною внутрішнього тиску ефективна площа пневматичної ресори змінюється [9].

Умови взаємодії колеса і рейки описують за допомогою теорії крипу. Точки контакту можуть знаходитись або на ободі, або на гребені колеса, що залежить від положення колісної пари в рейковій колії. Залежності реакцій від швидкості відносного проковзування можна записати таким чином:

$$F_x = K \frac{v_x}{V}; \quad (21)$$

$$F_y = K \frac{v_y}{V}; \quad (22)$$

де K – коефіцієнт крипу; v_x – швидкість поздовжнього проковзування колеса по рейці; v_y – швидкість поперечного проковзування колеса по рейці; V – швидкість руху рухомого складу.

Особливістю запропонованої розрахункової схеми та розробленої математичної моделі є врахування похилого розташування гідравлічних гасників коливань у другому ступені ресорного

підвішування, а також детальний опис процесів, що відбуваються під час роботи пневматичної системи ресорного підвішування.

Результати

Для перевірки працездатності розробленої математичної моделі побудуємо залежності «сила – деформація» пневматичної ресори за різних швидкостей руху рухомого складу (рис. 8–11).

Дослідження проведено для таких вихідних даних: початковий тиск у пневматичних ресорах складає 5 атм.; ефективна площа пневматичної ресори – 0,241915 м²; маса кузова – 49 320 кг; діаметр з'єднувального трубопроводу – 25 мм; довжина з'єднувального трубопроводу – 4 м; об'єм додаткового резервуара – 0,038 м³; амплітуда та довжина синусоїдальної нерівності рейкової колії – 15 мм та 10 м відповідно.

Для дослідження швидкісний діапазон електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан» було розділено на чотири інтервали: 120–140 км/год; 141–160 км/год (прискорений рух); 161–200 км/год (швидкісний рух); 201–250 км/год (високошвидкісний рух).

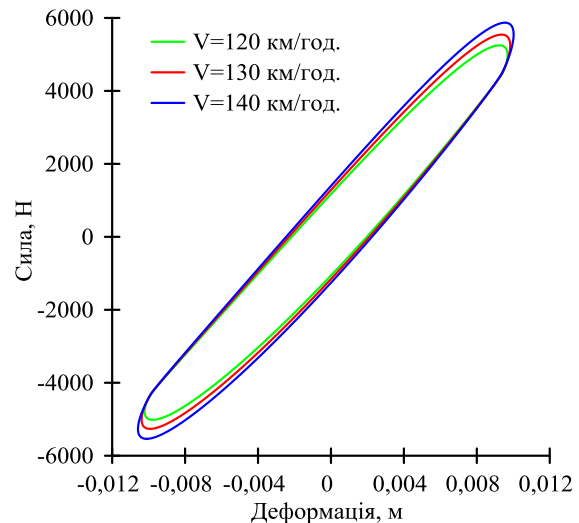


Рис. 8. Залежність «сила – деформація» пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування вагона швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан» в інтервалі швидкостей 120–140 км/год

Fig. 8. The force – strain dependence of the pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of the car of the EKr-1 «Tarpan» jointed electric train in the speed range of 120–140 km/h

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

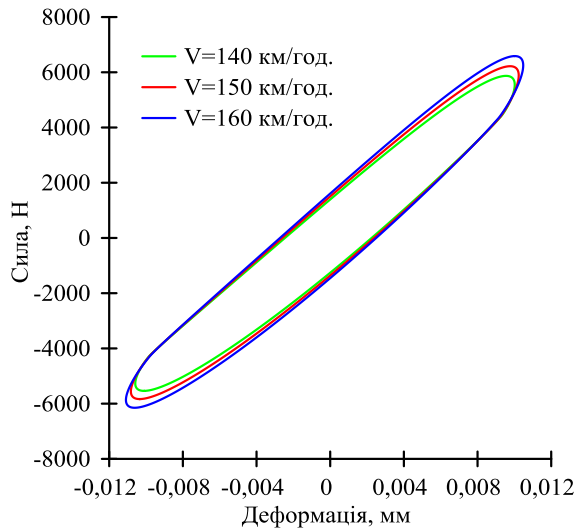


Рис. 9. Залежність «сила – деформація» пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування вагона швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан» в інтервалі швидкостей 141–160 км/год

Fig. 9. The force – strain dependence of the pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of the car of the EKr-1 «Tarpan» jointed electric train in the speed range of 141–160 km/h

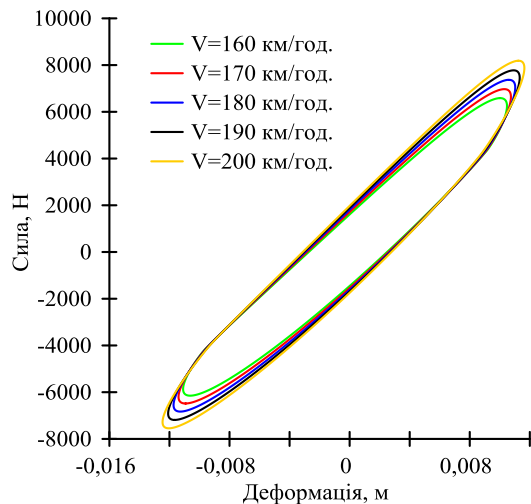


Рис. 10. Залежність «сила – деформація» пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування вагона швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан» в інтервалі швидкостей 161–200 км/год

Fig. 10. The force – strain dependence of the pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of the car of the EKr-1 «Tarpan» jointed electric train in the speed range of 161–200 km/h

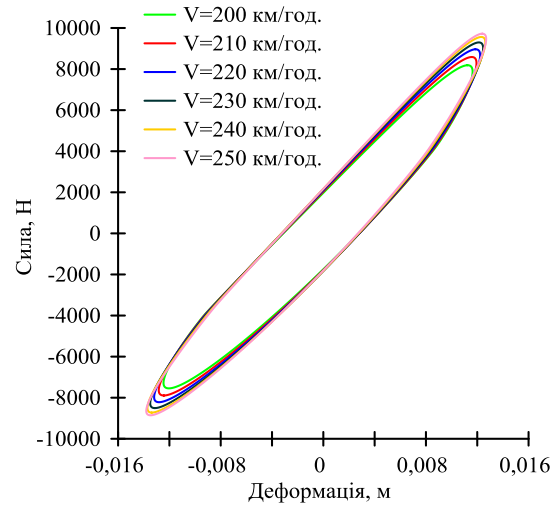


Рис. 11. Залежність «сила – деформація» пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування вагона швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан» в інтервалі швидкостей 201–250 км/го

Fig. 11. The force – strain dependence of the pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of the car of the EKr-1 «Tarpan» jointed electric train in the speed range of 201–250 km/h

Отже, у результаті аналізу залежності «сила – деформація» пневматичної ресори встановлено:

- за звичайного руху (120–140 км/год) максимальне значення реакції пневматичної ресори перебуває в межах 5,25÷5,88 кН;
- за прискореного руху (141–160 км/год) максимальне значення вказаної реакції перебуває в межах 5,88÷6,59 кН;
- за швидкісного руху (161–200 км/год) максимальне значення реакції складає 6,59÷8,20 кН;
- за високошвидкісного руху (201–250 км/год) максимальне значення складає 8,20÷9,73 кН.

Характер отриманих залежностей «сила – деформація» пневматичної ресори відповідає результатам проведених досліджень у роботі [10], що вказує на придатність розробленої математичної моделі для сучасного рухомого складу в умовах швидкісного руху.

Отримані результати дозволяють зробити висновки, що збільшення швидкості руху рухомого складу призводить до зростання сил у другому ступені ресорного підвішування. Це негативно впливатиме на динамічні показники рухомого складу, а саме коефіцієнти вертикальної

динаміки та максимальні прискорення кузова у вертикальній площині.

З практичної точки зору розроблена просторова математична модель дозволить ще на етапі проєктування швидкісного рухомого складу проводити комплекс теоретичних досліджень щодо встановлення оптимальних умов експлуатації пневматичної системи ресорного підвішування та рухомого складу в цілому для дотримання в допустимих межах динамічних показників та показників безпеки руху.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше побудовано просторову математичну модель динамічної поведінки швидкісного рухомого складу залізниці з урахуванням особливостей роботи пневматичної системи ресорного підвішування, детального врахування розташування в'язей та взаємодії колісної пари з рейковою колією у вертикальному та горизонтальному напрямках як у прямих, так і в кривих ділянках залізничної колії. Розробка такої моделі дозволить досліджувати динамічні показники рухомого складу залізниці та показники безпеки руху в умовах швидкісного руху та встановлювати оптимальні параметри в'язей першого та другого ступенів ресорного підвішування за різних кінематичних збурень з боку рейкової колії.

Висновки

1. На основі аналізу конструкційних особливостей першого та другого ступенів ресорного підвішування швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Гарпан» розроблено його розрахункову схему.

2. Описано фізичні залежності між реакціями кручених циліндричних пружин, гідравлічних гасників коливань, пневматичних ресор та сил взаємодії між колесом і рейкою та координатами розрахункової схеми.

3. Із використанням принципу д'Аламбера та термодинамічної моделі роботи пневматичної системи ресорного підвішування складено систему із 54 диференціальних рівнянь, яка дозволяє проводити теоретичні дослідження динамічної поведінки рухомого складу за швидкостей його руху до 250 км/год.

4. Перевірку працездатності розробленої просторової математичної моделі проведено шляхом побудови залежностей «сила – деформація» пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування. На основі досліджень встановлено, що максимальне значення сили, яка діє на пневматичну ресору, у разі збільшення швидкості руху від 120 до 250 км/год збільшується на 85 %, що, відповідно, збільшуватиме динамічні показники швидкісного рухомого складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дьомін Р. Ю., Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю., Сергієнко О. В. *Стійкість рухомого складу від сходження з рейок*: монографія. Северодонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2022. 232 с.
2. Рейдемейстер А. Г., Кивишева А. В. Зависимость свойств пневматической ресоры от пневматического сопротивления дросселя. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 2 (62). С. 157–164. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67339>
3. Рейдемейстер А. Г., Лагуза А. В. Определение характеристик дросселирующего устройства для пневматической ресоры. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123394>
4. Bruni S., Vinolas J., Berg M., Polach O., Stichel S. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics*. 2011. Vol. 49. Iss. 7. P. 1021–1072. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.586430>
5. Lu C., Chen D., Shi J., Li Z. Research on wheel-rail dynamic interaction of high-speed railway under low adhesion condition. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 157. P. 107935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107935>
6. Kurhan M., Fischer S., Tiutkin O., Kurhan D., Hmelevska N. Development of High-Speed Railway Network in Europe: A Case Study of Ukraine. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2024. Vol. 52. Iss. 2. P. 151–158. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.23464>
7. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2024. Vol. 21. Iss. 1. P. 207–220. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.21.1.2024.1.13>

8. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Kovalchuk V., Dovhanyuk S., Voznyak O. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>
9. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Kravets I., Korendiy V., Royko Y. Method of experimental determination of the effective area of a pneumatic spring of high-speed rolling stock. *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 55. P. 254–260. DOI: <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24284>
10. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sobolevska Y., Royko Y., Kravets I. Determining the effect of additional tank volume and air pressure in the spring on the dynamic indicators of a pneumatic system of spring suspension in high-speed railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3. No. 7 (129). P. 47–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304051>
11. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sysyn M., Sobolevska Y. Influence of the geometric parameters of the connecting pipeline on the stiffness and damping of the pneumatic spring suspension at high-speed rolling stock. *Vehicle System Dynamics*. 2024. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2425022>
12. Mendia-Garcia I., Gil-Negrete Laborda N., Pradera-Mallabiabarrena A., Berg M. A survey on the modelling of air springs – secondary suspension in railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 2020. Vol. 60. Iss. 3. P. 835–864. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1838566>
13. Nabochenko O., Sysyn M., Fischer S. Ballast Settlement Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2024. Vol. 11. Iss. 4. P. 2598–2637. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00388-5>
14. Nabochenko O., Sysyn M., Krumnow N., Fischer S. Mechanism of cross-level settlements and void accumulation of wide and conventional sleepers in railway ballast. *Railway Engineering Science*. 2024. Vol. 32. P. 361–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00329-5>

A. YA. KUZYSHYN^{1*,2}, V. V. KOVALCHUK³, YU. H. SOBOLEVSKA⁴

^{1*}Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. +38 (032) 267 99 74, e-mail andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

²Lviv Research Institute of Forensic Science, Lypynskyi St., 54, Lviv, Ukraine, 79024, tel. +38 (032) 231 76 13, e-mail andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID0000-0002-3012-5395

²Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. +38 (032) 267 99 74, e-mail vitalii.v.kovalchuk@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-4350-1756

³Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. +38 (032) 267 99 74, e-mail yuliia.h.sobolevska@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8087-2014

A Spatial Mathematical Model of the Dynamic Behavior of Modern Rolling Stock in High-Speed Traffic

Purpose. The paper aims to develop a spatial mathematical model of the high-speed electric train EKr-1 “Tarpan” taking into account the design features of its first and second stages of spring suspension. **Methodology.** The design scheme of the electric train is taken as a set of 7 solids connected by ligaments of different rheology. Each of the bodies performs spatial oscillations. In this case, the wheel set is considered as a system with two degrees of freedom (lateral displacement and wagging). The angular and linear displacements of the bodies are considered as generalized coordinates. The resulting mechanical system has 26 degrees of freedom. The differential equations of motion are written using the d'Alembert principle. The kinematic perturbation of oscillations due to movement along unevennesses of the track in both vertical and horizontal directions is considered. The presence of elastic and dissipative viscosities is taken into account in the first and second stages of the spring suspension. The hypothesis of geometric linearity of deformations is accepted. The reactions acting in the longitudinal (in the wheel plane) and transverse directions are taken into account at the point of contact between the wheel and the rail. The longitudinal and transverse reactions are quantitatively described by the nonlinear creep hypothesis. The modeling of hydraulic vibration dampers takes into account their inclined location, which makes it possible to dampen vibrations in the vertical and horizontal directions. **Findings.** The spatial design scheme of the studied object was chosen. The geometric dependences between the deformations of the ligaments and the generalized coordinates of the design scheme are obtained. The physical dependencies between the reactions of the ties and their deformations are described, taking into account the pneumatic spring suspension system. The differential equations of oscillations for each element of the design scheme are derived. **Originality.** For the first time, a spatial mathematical model of the dynamic behavior of high-speed railroad rolling

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

stock was constructed, taking into account the peculiarities of the pneumatic spring suspension system, the location of the bindings, and the interaction of the wheelset with the rail track in the vertical and horizontal directions, both in straight and curved sections of the railroad track. **Practical value.** The development of such a model will make it possible to numerically study its dynamic and safety performance in high-speed traffic conditions at the design stage of high-speed railroad rolling stock and to establish the optimal parameters of the first and second stages of spring suspension, while setting various kinds of kinematic disturbances from the rail track.

Key words: high-speed rolling stock; mathematical model; rail track; structural ties; oscillations; dissipation

REFERENCES

1. Djomin, R. Ju., Djomin, Ju. V., Chernjak, Gh. Ju., & Serghijenko, O. V. (2022). *Stiikist rukhomoho skladu vid skhodzhennia z reioik: monohrafiia*. Sievierodonetsk: vyd-vo Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. (in Ukrainian)
2. Reidemeister, O. H., & Kivisheva, A. V. (2016). Dependence of air spring parameters on throttle resistance. *Science and Transport Progress*, 2(62), 157-164. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67339> (in Russian)
3. Reidemeister, O. H., & Laguza, A. V. (2021). Determination of characteristics of throttling device for pneumatic spring. *Science and Transport Progress*, 1(73), 66-76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123394> (in Russian)
4. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O., & Stichel, S. (2011). Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics*, 49(7), 1021-1072. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.586430> (in English)
5. Lu, C., Chen, D., Shi, J., & Li, Z. (2024). Research on wheel-rail dynamic interaction of high-speed railway under low adhesion condition. *Engineering Failure Analysis*, 157, 107935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107935> (in English)
6. 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)
7. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2024). Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(1), 207-220. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.21.1.2024.1.13> (in English)
8. Kuzyshyn, A., Batig, A., Kostritsa, S., Sobolevska, J., Kovalchuk, V., Dovhanyuk, S., & Voznyak, O. (2018). Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences*, 234, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003> (in English)
9. Kuzyshyn, A., Kovalchuk, V., Kravets, I., Korendiy, V., & Royko, Y. (2024). Method of experimental determination of the effective area of a pneumatic spring of high-speed rolling stock. *Vibroengineering Procedia*, 55, 254-260. DOI: <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24284> (in English)
10. Kuzyshyn, A., Kovalchuk, V., Sobolevska, Y., Royko, Y., & Kravets, I. (2024). Determining the effect of additional tank volume and air pressure in the spring on the dynamic indicators of a pneumatic system of spring suspension in high-speed railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(129)), 47-62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304051> (in English)
11. Kuzyshyn, A., Kovalchuk, V., Sysyn, M., & Sobolevska, Y. (2024). Influence of the geometric parameters of the connecting pipeline on the stiffness and damping of the pneumatic spring suspension at high-speed rolling stock. *Vehicle System Dynamics*, 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2425022> (in English)
12. Mendia-Garcia, I., Gil-Negrete Laborda, N., Pradera-Mallabiarrena, A., & Berg, M. (2020). A survey on the modelling of air springs – secondary suspension in railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 60(3), 835-864. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1838566> (in English)
13. Nabochenko, O., Sysyn, M., & Fischer, S. (2024). Ballast Settlement Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(4), 2598-2637. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00388-5> (in English)
14. Nabochenko, O., Sysyn, M., Krumnow, N., & Fischer, S. (2024). Mechanism of cross-level settlements and void accumulation of wide and conventional sleepers in railway ballast. *Railway Engineering Science*, 32(3), 361-383. <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00329-5> (in English)

Надійшла до редколегії: 22.08.2024

Прийнята до друку: 20.12.2024

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 625.12:624.15-048.32

О. В. ГРОМОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, ел. пошта o.i.hromova@ust.edu.ua, ORCID 000-0002-5149-4165

Підбір складових та способи модифікації ґрунтоцементу з метою підвищення експлуатаційних властивостей земляного полотна

Мета. Основою метою наукової статті є обґрунтований вибір складових компонентів ґрунтоцементних армувальних структурних елементів і методів модифікування структури ґрунтоцементу для підсилення земляного полотна під залізничну колію. **Методика.** Для влаштування ґрунтоцементних підсилювальних елементів під суміщену залізничну колію за бурозмішувальною технологією розв'язано коло задач, що включають: обґрунтований вибір складових компонентів і модифікаторів ґрунтоцементного елемента; визначення властивостей компонентів; встановлення експлуатаційних вимог до ґрунтоцементу і його складу; проектування оптимальних складів із заданими експлуатаційними характеристиками із врахуванням властивостей ґрунтів і режимів роботи. **Результати.** Проведено дослідження впливу складових компонентів ґрунтоцементу на реологічні властивості ґрунтоцементних сумішей та фізико-механічні властивості ґрунтоцементу. На основі обробки даних методом статистичного аналізу обрано оптимальний вміст складових компонентів ґрунтоцементних сумішей, щоб забезпечити технологічні і експлуатаційні показники ґрунтоцементу для різних типів ґрунтів і підсилити ґрунтову основу під час влаштування колії. Досліджено вплив мінеральних зернистих, волокнистих і хімічних модифікаторів на властивості ґрунтоцементу. **Наукова новизна.** З'ясовано можливість використання вертикальних армувальних елементів із ґрунтоцементу з необхідними технологічними та експлуатаційними показниками, отриманих за бурозмішувальною технологією, для підсилення земляного полотна із врахуванням напружено-деформованого стану і морфології ґрунтових основ. Авторка на основі проведеного дослідження здійснила спробу підібрати складові компоненти і розробити оптимальні склади ґрунтоцементу для підсилення ґрунтового полотна залізниці під суміщену колію. Також розглянуто напрями модифікації ґрунтоцементу мінеральними, волокнистими і хімічними добавками. **Практична значимість.** Проведене дослідження дає можливість отримати ґрунтоцементні елементи оптимального складу і властивостей для різних типів ґрунтів і напружено-деформованого стану з метою вертикального підсилення ґрунтових основ під залізничну колію. Для модифікування структури ґрунтоцементу і мінімізації витрати цементу запропоновано застосовувати як модифікувальні компоненти підсилення фіброві волокна. Щоб збільшити щільність, тріщиностійкість, міцність і модуля деформативності і поліпшити пластичність суміші, рекомендовано використати хімічні модифікатори до 0,3 % і для економії цементу – часток тонкодисперсних відходів промисловості у вигляді меленого шлаку чи відсіву каменеподрібнення в кількості 20...30 %.

Ключові слова: ґрунтоцемент; ґрунтоцементна паля; бурозмішувальна технологія; модифікатор; ґрунтова основа; земляне полотно; ґрунт; цемент

Вступ

Зміцнення ґрунтової основи є одним із найскладніших і трудомістких процесів у будівельній галузі, як у промислово-цивільному будівництві, так і в дорожньому і під час реконструкції й підсилення ґрунту під фундаментами споруд,

і під час влаштування підсилення земляного полотна під залізничну колію.

Способам влаштування ґрунтоцементних паль та дослідженням властивостей ґрунтоцементів присвячені роботи багатьох авторів. Зокрема, у роботах [6, 8, 10, 11] досліджено залежності механічних властивостей ґрунтоцементу

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

від морфології ґрунтів, вмісту цементу, ступеня ущільнення ґрунтоцементної суміші, водоцементного відношення суміші, вмісту добавок.

У роботах [4–6] показано ефективність улаштування ґрунтоцементних паль за бурозмішувальною технологією та особливості її використання. Основну увагу приділено шляхам підвищення міцності ґрунтоцементу.

У роботі [9, 12] виконано оцінку впливу пластифікувальних добавок на міцність ґрунтоцементу.

Установлено [10], що щільність ґрунтоцементу залежить від насиченості ґрунту водою, залишкова кількість якої після гідратації цементу формує пористу структуру матеріалу, яка, у свою чергу, є провідною у формуванні механічних властивостей ґрунтоцементу.

Ефективне використання зв'язувальних властивостей цементу в разі зміцнення ґрунту залежить від ступеня зволоження ґрунтоцементної суміші з подальшим її ущільненням. У випадку недостатнього зволоження суміші неможливо досягти потрібної міцності ґрунтоцементу, навіть за умови надлишкової кількості цементу, задовільних властивостей ґрунту чи достатнього ущільнення [3].

Фізико-хімічні властивості лесових і лесованих суглинків, а саме вміст глинистих частинок, лужна реакція середовища, незначна кількість легкорозчинних солей, легке диспергування під час зволоження за рахунок водорозчинних зв'язків між частинками сприяють їх використанню для виготовлення ґрунтоцементу [2, 3].

Механічні властивості ґрунтоцементу забезпечуються більшою мірою утворенням кристалізаційних зв'язків, що виникають як новоутворення в процесі тверднення ґрунтоцементної суміші. На величину модуля деформації ґрунтоцементу значно впливає його щільність. Експериментально доведено, що за однакової призмової міцності модуль деформації більший для зразків із більшою щільністю [2].

Підвищення механічних характеристик ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу уповільнюється після досягнення величини у 20 %, тобто цей вміст слід вважати оптимальним у разі використання ґрунтоцементу для армування ґрунту [2].

Характеристикою впливу морфології ґрунту взято число пластичності I_p , що характеризує вміст глинистих частинок у ґрунті [2].

Механічні та експлуатаційні характеристики ґрунтоцементу можна поліпшити введенням добавок-модифікаторів. Поліпшує механічні характеристики ґрунтоцементу наявність зернистих модифікаторів-піщаних і гравійних частинок. Витрати цементу можна зменшити, при цьому перемішування й ущільнення суміші полегшується. Це вказує на доцільність використання гранулометричних модифікаторів (пісків, хвостів, шлаку, золи тощо) у ґрунтах для їх закріплення. Під час введення домішок піску та хвостів у кількості до 20 %, зростання міцності та модуля деформації складає 20...40 % [2]. Зокрема, вплив золи-виношення на властивості ґрунтоцементу досліджено в роботах [1, 7].

Також для отримання заданих реологічних властивостей ґрунтоцементної суміші застосовують хімічні добавки-модифікатори [2, 9, 12]. Зокрема, у ВСН 40–88 [2] наведено перелік модифікаторів, які рекомендовано вводити в склад ґрунтоцементу залежно від параметрів ґрунтів. Загалом усі добавки вводять із метою зменшення витрати цементу та поліпшення технологічних властивостей суміші.

Важливим параметром суміші для отримання ґрунтоцементу є водоцементне відношення, яке за різними оцінками може змінюватись від 0,6 до 1 [2].

За даними [7], процес твердіння ґрунтоцементу, на відміну від твердіння бетону, має більш тривалий характер. Швидкість твердіння істотно залежить від численних факторів – температури середовища, хімічного складу ґрунтової води, а також від типу ґрунту, що бере участь у формуванні ґрунтоцементу. У піщаних ґрунтах набір міцності відбувається найшвидше. На думку різних авторів, ґрунтоцемент на основі піску набирає приблизно 50 % від повної міцності через 5...7 днів, а в тридцятиденний термін – практично повну міцність.

Більш тривалим є процес набору міцності ґрунтоцементу, сформованого в глинистих ґрунтах, що завжди вимагає проведення додаткових досліджень, на основі результатів яких може бути визначено період навантаження паль.

Вплив уведення фібрових матеріалів розглянуто в роботах [2, 14].

Не викликає сумнівів, що вибір складових і розробка ефективного матеріалу й методу під-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

силення земляного полотна є складною багато-параметричною задачею під час влаштування залізничної колії. Згідно з вітчизняним і закордонним досвідом, описаним у розглянутих вище роботах, вибір складових і методів модифікування під час влаштування елементів підсилення земляного полотна можна обґрунтувати, для чого провести аналіз за позитивними та негативними параметрами, які характеризують конкретні експлуатаційні умови розміщення в ґрунтовій основі елементів підсилення. Це викликає необхідність дослідити й обґрунтовано вибрати складові компоненти і спосіб модифікації ґрунтоцементного елемента для підсилення за найбільш оптимальних параметрів технології його влаштування.

Мета

Основною метою наукової статті є обґрунтований вибір складових компонентів ґрунтоцементних армувальних структурних елементів і методів модифікування структури ґрунтоцементу для підсилення земляного полотна під залізничну колію за бурозмішувальною технологією.

Методика

Комплекс виконання містить визначення ефективних параметрів підсилення земляного полотна на основі інноваційної бурозмішувальної технології шляхом обґрунтованого вибору складових компонентів ґрунтоцементу, проєктування оптимальних складів із врахуванням властивостей ґрунтів для влаштування армувального елемента під суміщену залізничну колію.

Важливою задачею отримання високоексплуатаційних показників ґрунтової основи є досконалий вибір складових компонентів ґрунтоцементу для розробки оптимальних рецептур спеціальних ґрунтоцементних розчинів, що дозволяють досягати підвищення несної здатності та зменшення інтенсивності й рівня деформування ґрунтів під суміщену залізничну колію з інтенсивним високошвидкісним рухом залізничного транспорту.

Для створення ґрунтоцементних структур із заданими фізико-механічними властивостями необхідно застосувати комплекси модифікаторів, що поліпшують технологічність суміші, збільшують її рухливість і зв'язність, знижують в'язкість і поліпшують здатність до нагнітання,

при цьому з'являється можливість регулювати строки тужавіння суміші і швидкість набору міцності ґрунтоцементної системи, забезпечувати фізико-хімічну сумісність компонентів для досягнення заданих якостей, а також можливість підвищити або забезпечити комплекс необхідних спеціальних експлуатаційних властивостей, таких як електроізоляційні, антикорозійні, водонепроникні характеристики ґрунтоцементних структур.

Під час постановки задач і способів їх розв'язання необхідно сформувати комплекс вимог до ґрунтоцементу для його ефективного застосування в разі підсилення земляного полотна під суміщену залізничну колію. На основі встановлених вимог виконують підбір складових і розробку рецептур ґрунтоцементних розчинів, що дозволяють максимально ефективно реалізувати технологію підсилення земляного полотна залізниць.

До ґрунтоцементу як армувального елемента в структурі ґрунту ставлять такі експлуатаційні вимоги:

- достатня механічна міцність;
- модуль деформації ґрунту;
- підвищена щільність скелета ґрунту;
- водостійкість.

У забезпеченні комплексу механічних і експлуатаційних вимог важливу роль відіграє склад ґрунтоцементу. На основі проведеного попереднього обґрунтування [13] взято такі його показники:

- вміст цементу (відсоток вмісту цементу від маси скелета ґрунту в суміші);
- водонасичення ґрунтоцементної суміші;
- вміст модифікувальних добавок (наповнювачів, добавок, заповнювачів тощо).

Із метою направленої модифікування структури ґрунтоцементу, поліпшення технологічних і експлуатаційних властивостей у дослідженні взято такі контрольовані складові:

- вміст мінерального модифікатора (меленого доменного шлаку);
- вміст хімічного модифікатора (суперпластифікатора СП–1 (С–3));
- вміст крупнодисперсної домішки (відсіву каменедроблення або піску).

Як базовий компонент для розробки складів ґрунтоцементу було обрано декілька типів ґрунтів, які потребують стабілізації і підсилення.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Найбільш технологічними для виготовлення ґрунтоцементу бурозмішувальним методом є лесові і лесовані ґрунти. Для отримання достовірних даних рекомендовано перед влаштуванням ґрунтоцементних елементів провести попередньо заміси на ґрунтах, на яких передбачено влаштовувати ґрунтоцементні палі. До ґрунтів, що не потребують модифікування гранулометричними добавками, належать великоуламкові ґрунти оптимального або близького до оптимального зернового складу; неоднорідні піски (крупні, середньої крупності), супіски з числом пластичності понад 3 (переважно супіски піщаністі, супіски пилюваті), а також легкі суглинки.

Для проведення досліджень на будівельних майданчиках були відібрані зразки ґрунтів, які потребують підсилення на різних ділянках земляного полотна. Основними параметрами властивостей ґрунтів, що визначають несну здатність основ і їх деформації, є такі [3]:

міцності – кут внутрішнього тертя φ , питоме зчеплення c , межа міцності на одновісний стиск скельного ґрунту R_c ;

– деформативності – модуль деформації E , модуль пружності E_p , коефіцієнт поперечної деформації ν ;

– фізичні – щільність ρ , питома вага γ , вологість W , показник плинності IL , крупність фракцій, однорідність складу.

За результатами інженерно-геологічних вишукувань на відповідних майданчиках для подальших експериментальних досліджень були обрані такі ґрунти:

– ґрунт № 1: суглинок тугопластичний просідний, число пластичності $I_p = 12\%$;

– ґрунт № 2: суглинок м'якопластичний, число пластичності $I_p = 9\%$;

– ґрунт № 3: супісок пластичний просідний, число пластичності $I_p = 6\%$.

Як зв'язувальну речовину для виготовлення ґрунтоцементних зразків і їх подальшого дослідження було обрано цемент із гідравлічно-пуццолановими властивостями ПЦ Ш/Б–Ш–400 Криворізького цементного заводу, який характеризується помірною динамікою набору ранньої міцності та високою міцністю в більш пізні терміни твердіння та технологічністю у застосуванні. Цемент за фізико-механічними властивостями відповідає вимогам ДСТУ Б В. 2.7–46–96 марки ПЦШ/Б–Ш–400 з вмістом добавки доменного гранульованого шлаку 25...35% і чистого клінкера 65...75%.

Як часткову заміну цементу з метою його економії використовують різноманітні мінеральні добавки і наповнювачі, що модифікують і сприяють підвищенню щільності скелета ґрунтоцементу, а також водостійкості під час твердіння у вологих умовах. Для оптимізації гранулометричного складу ґрунтової суміші застосовують гранулометричні добавки дисперсних матеріалів, що відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7–30, ДСТУ Б В.2.7–35, ДСТУ Б В.2.7–149. За проведеними попередніми дослідженнями, вміст добавок дисперсних матеріалів становить від 15 до 30% від маси ґрунту, оптимальну кількість визначають під час підбору складу суміші в лабораторії.

Як мінеральний модифікатор у дослідженні використано мелений доменний гранульований шлак ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». У табл. 1 наведено фізико-механічні властивості доменного гранульованого шлаку, застосованого в дослідженні.

Таблиця 1

**Фізико-механічні властивості меленого гранульованого доменного шлаку
ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»**

Table 1

**Physical and mechanical properties of ground granulated blast furnace slag at PJSC
«Dneprovsky Integrated Iron & Steel Works»**

Активність f_{28} , МПа	Модуль пружності, $E_{пруж}$, МПа	Модуль основності, M_0	Модуль активності, M_a	Коефіцієнт якості, K_a	Насипна густина, ρ_n , кг/м ³	Істинна густина, ρ , г/см ³	Питома поверхня, $S_{пит}$, см ² /г
6,5	400	1,24	0,25	1,68	1 145	1,97	2 800

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Як дрібнозернистий модифікатор у дослідженні використано дніпровський річковий кварцовий пісок середньої крупності $M_k = 3,2$, вологістю 7 %, середньою густиною $2,62 \text{ г/см}^3$, та гранітний відсів від каменеподрібнення. Під час введення домішок піску та відсіву від каменеподрібнення у кількості до 10...30 % відбувається

зростання міцності за стискання зразків та модуля деформації до 30 %.

Характеристику зернового складу та фізичних властивостей піску та відсіву наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Гранулометричний склад дніпровського річкового кварцового піску

Table 2

Particle size distribution of Dnipro river quartz sand

Залишки на ситах	Розмір сит, мм						Менше ніж 0,16 мм
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
частинні, г	0	9,0	554	254	76	26	81,0
частинні, %	0	0,9	55,4	25,4	7,6	2,6	8,1
Повні, %	0	0,9	56,3	81,7	89,3	91,9	100

Таблиця 3

Гранулометричний склад і фізичні властивості відсіву Рибальського кар'єру

Table 3

Particle size distribution and physical properties of Rybalsky open pit screenings

$\rho_s, \text{ г/см}^3$	Гранулометричний склад, %	Значення характеристик відсіву	M_k	$W, \%$
2,7	> 2 мм	0,70	1,5	5
	2...0,5 мм	3,42		
	0,5...0,25 мм	19,18		
	0,25...0,1 мм	67,90		
	<0,1 мм	8,80		

Для зниження водопотреби ґрунтоцементної суміші та збереження рухливості як пластифікатору вальну добавку застосовано суперпластифікатор СПІ (С–3) [12], що являє собою сульфовані продукти конденсації формальдегіду. Для досліджень взято значення вмісту добавки пластифікатора С–3 у відсотках від маси цементу 0, 0,3 і 0,5 %.

Оскільки на різних будівельних майданчиках можуть бути різні ґрунтові основи, для визначення оптимального вмісту складових перед проектуванням необхідно проводити експери-

ментальні дослідження на дослідних майданчиках із відпрацювання технологічних параметрів укріплення ґрунтів і визначення оптимальних значень міцності в разі стиску f_n та модуля деформації E в конкретних експлуатаційних умовах.

Результати

У ґрунтоцементній суміші основним компонентом, що зміцнює структуру і впливає на механічні властивості ґрунтоцементних елементів, є цемент. Тому в дослідженні ставимо задачу дослідити залежність міцності в разі стиску та модуля деформації від вмісту цементу, отримати

залежності (f_n , $E=f(\Pi)$) і за графіками визначити оптимальний вміст цементу.

Згідно з отриманими попередніми даними для різних типів ґрунтів за досліджувану кількість цементу для досягнення оптимальної міцності ґрунтоцементу взято 10, 20 і 30 % [13].

Таблиця 4

Середні значення механічних характеристик ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу

Table 4

Average values of mechanical characteristics of soil cement depending on the cement content

Вміст цементу Π , %	В/Ц	Щільність скелета ρ_d , т/м ³	Середні значення механічних характеристик	
			Міцність f_n , МПа	Модуль деформації E , МПа
5	0,8	1,35	0,5	60
10		1,36	1,3	170
15		1,365	2,1	260
20		1,37	2,7	360
25		1,38	3,2	410
30		1,39	3,7	440
35		1,39	3,9	450

Для модифікації технологічних властивостей ґрунтоцементної суміші під час влаштування армувальних елементів уведено добавку суперпластифікатора С–3 в кількості від 0,3 до 0,5 %. Таку кількість добавки взято за результатами попередніх досліджень для встановлення оптимальної технологічної ефективності.

Результати визначення легкоукладальності ґрунтоцементних розчинів залежно від вмісту цементу та суперпластифікатора наведено в табл. 5.

Згідно з незначним приростом пластичності та значним впливом на міцність, для подальших досліджень взято вміст суперпластифікатора 0,3 % від маси цементу. Для оцінки впливу вмісту домішок на характеристики ґрунтоцементного розчину взято значення вмісту цементу 30 % для ґрунту 1 та 20 % для ґрунтів 2 і 3.

Таблиця 5

Реологічні характеристики ґрунтоцементної суміші залежно від вмісту цементу та пластифікуючого модифікатора

Table 5

Rheological characteristics of soil-cement mixture depending on cement content and plasticizing modifier

Вид ґрунту	В/Ц, %	Вміст цементу, %	Вміст С–3, %	Легкоукладальність, см	
Ґрунт 1	0,8	10	0	7	
			0,3	10	
			0,5	14	
		20	0	8	
			0,3	12	
			0,5	15	
			30	0	8
				0,3	14
				0,5	17
Ґрунт 2	0,8	10	0	6	
			0,3	8	
			0,5	14	
		20	0	8	
			0,3	12	
			0,5	15	
			30	0	9
				0,3	12
				0,5	16
Ґрунт 3	0,8	10	0	4	
			0,3	6	
			0,5	10	
		20	0	5	
			0,3	10	
			0,5	14	
			30	0	7
				0,3	12
				0,5	16

Середнені результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу та модифікувальної добавки наведено на рис. 1.

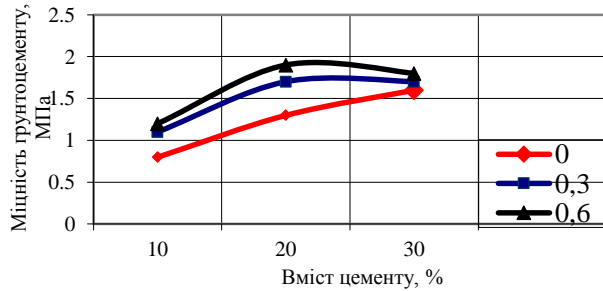


Рис. 1. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту цементу та модифікатора

Fig. 1. Dependence of soil cement strength on cement and modifier content

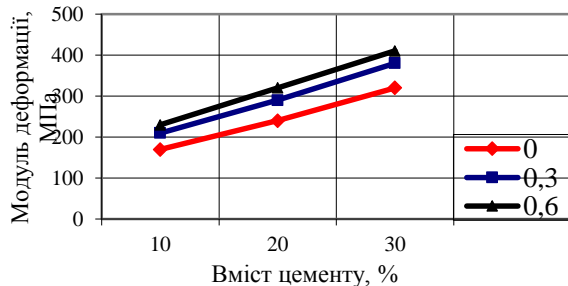


Рис. 2. Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від вмісту цементу і добавки

Fig. 2. Dependence of the modulus of deformation of soil-cement on the content of cement and additives

Аналіз графіків залежності механічних характеристик від вмісту цементу показує, що зі збільшенням вмісту цементу як призмова міцність, так і модуль деформації зростають практично пропорційно до 25 % вмісту, за подальшого збільшення вмісту цементу приріст зростання характеристик уповільнюється. Звідси можна зробити висновок, що ефективними межами вмісту цементу для підсилення основ армуванням ґрунтів є 15...25 % від ваги ґрунту в суміші.

Результати визначення легкоукладальності ґрунтоцементної суміші залежно від вмісту шлаку наведено в табл. 6.

Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку наведено в табл. 7 та на рис. 3.

Таблиця 6

Реологічні властивості ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку

Table 6

Rheological properties of soil cement depending on slag content

Вид ґрунту	В/Ц	Вміст цементу, %	Вміст шлаку, %	Легкоукладальність, см
Ґрунт 1	0,8	30	0	14
			20	12
			40	9
Ґрунт 2	0,8	20	0	12
			20	8
			40	6
Ґрунт 3	0,8	20	0	10
			20	6
			40	3

Таблиця 7

Механічні характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку

Table 7

Mechanical characteristics of soil cement depending on slag content

Вид ґрунту	I_p , %	Вміст цементу, %	Вміст шлаку, %	Значення характеристики		
				f_n , МПа		E , МПа
				7 діб	28 діб	
Ґрунт 1	12	30	0	1,5	1,8	380
			20	1,7	2,9	440
			40	1,9	3,2	460
Ґрунт 2	9	20	0	1,2	2,8	380
			20	1,4	3,6	460
			40	1,5	4,0	450
Ґрунт 3	6	20	0	1,5	3,8	400
			20	1,6	4,2	440
			40	1,8	4,3	460

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Згідно з незначним впливом вмісту шлаку 40 % на приріст міцності та значним зниженням пластичності суміші, взято вміст шлаку 20 % від маси цементу для ґрунтів 1 і 2, та вміст шлаку 0 % для ґрунту 3.

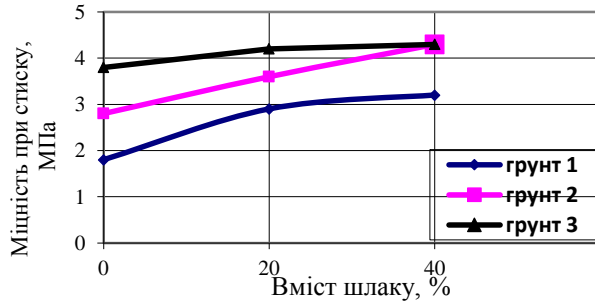


Рис. 3. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту шлаку

Fig. 3. Dependence of soil cement strength on slag content

Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу для різних типів укріплювальних ґрунтів залежно від вмісту відсіву наведено в табл. 8 та на рис. 4.

Таблиця 8

Характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту відсіву

Table 8

Characteristics of soil cement depending on the content of screenings

Вид ґрунту	I_p , %	Вміст цементу, %	Вміст відсіву, %	Значення характеристики		
				f_n , МПа		E , МПа
				7 діб	28 діб	
ґрунт 1	12	30	0	1,7	2,9	440
			20	1,8	3,5	480
			40	2,0	3,8	510
ґрунт 2	9	20	0	1,4	3,6	460
			20	1,8	4,2	460
			40	2,1	4,4	480
ґрунт 3	6	20	0	1,5	3,8	400
			20	1,9	3,9	440
			40	2,2	4,2	490

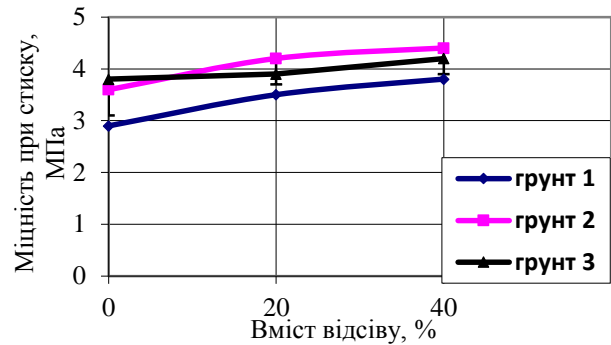


Рис. 4. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту відсіву

Fig. 4. Dependence of soil cement strength on the screening content

Відповідно до незначного впливу вмісту відсіву шлаку 40 % на приріст міцності та значного зниження пластичності суміші, взято вміст відсіву 20 % для ґрунту 1. Для ґрунтів 2 та 3 відсів не застосовують через значне зниження пластичності суміші.

Результати визначення легкоукладальності ґрунтоцементної суміші залежно від вмісту відсіву наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Реологічні характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту відсіву

Table 9

Rheological characteristics of soil cement depending on the content of screenings

Вид ґрунту	В/Ц	Вміст цементу, %	Вміст відсіву, %		Легкоукладальність, см
			відсів	ґрунт	
ґрунт 1	0,8	30	0	100	12
			20	80	10
			40	60	6
ґрунт 2	0,8	20	0	100	8
			20	80	4
			40	60	1
ґрунт 3	0,8	20	0	100	10
			20	80	4
			40	60	1

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту піску наведені на рис. 5.

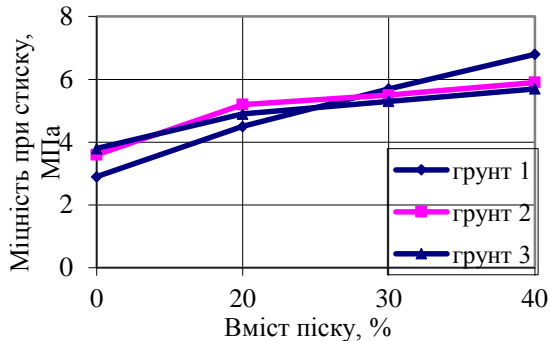


Рис. 5. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту піску

Fig. 5. Dependence of soil cement strength on the sand content

За отриманими результатами для розглянутих типів ґрунтів можуть бути рекомендовані такі співвідношення складових компонентів:

– ґрунт № 1: суглинок $I_p = 12\%$; цемент 30%; суперпластифікатор С–3 0,3%; мелений доменний шлак 20%; відсів каменеподрібнення 20%.

– ґрунт № 2: суглинок $I_p = 9\%$; цемент 20%; суперпластифікатор С–3 0,3%; мелений доменний шлак 20%;

– ґрунт № 3: супісок $I_p = 6\%$, цемент 20%; суперпластифікатор С–3 0,3%; відсів каменеподрібнення – 20...30%.

Для уточнення отриманих результатів та рекомендованих рецептур складів необхідно отримати значення властивостей ґрунтоцементів у більш пізньому віці твердіння і на реальних ґрунтах влаштування ґрунтоцементних паль.

Ще одним зі способів модифікації структури ґрунтоцементу з метою підвищення тріщиностійкості, в'язкості руйнування, зносостійкості, зниження усадки й повзучості є армування ґрунтоцементу фіброю. Армований фіброю ґрунтоцемент є різновидом дисперсно-армованого бетону, його виготовляють із ґрунтоцементного або піщано-цементного розчину, в якому як армувальний компонент рекомендовано використовувати сталеву, полімерну або базальтову фібру, що рівномірно розподіляється по об'єму суміші. Спільність роботи ґрунтоцементної матриці і волокна (фібр) забезпечується за рахунок зчеплення по їх поверхні й анкерування фібри за рахунок періодичного профілю та її кривизни

в поздовжньому і поперечному напрямку [2, 14]. Застосування ґрунтофібробетону як підсилювального елемента дозволяє або зовсім відмовитися від арматурного каркасу, або обмежитися його використанням у верхній частині палі для зв'язку з елементами ростверку. Дослідні зразки із застосуванням волокон базальтової і поліпропіленової фібри та характер руйнування зразків наведено на рис. 6.

У дослідженні фізико-механічні властивості зразків ґрунтоцементного фібробетону, виготовлених із застосуванням добавки С–3 у кількості 0,3 і 5% базальтової і поліпропіленової фібри відповідно від маси цементу, показали збільшення міцності до 6...8 МПа. Із додаванням фібри спостерігалось в'язке руйнування і зменшення тріщиноутворення ґрунтоцементу, що дає можливість рекомендувати використовувати волокна для армування паль.

a – a



б – б



в – в



Рис. 6. Підсилення ґрунтоцементу фіброю:
a – зразки із базальтовою і поліпропіленовою фіброю;
б – пластичне руйнування зразків із додаванням фібри;
в – структура фіброґрунтоцементу

Fig. 6. Fiber reinforcement of soil cement:
a – samples with basalt and polypropylene fiber;
b – plastic fracture of samples with fiber addition;
c – structure of fiber soil cement

До експлуатаційних властивостей ґрунтоцементу належить водостійкість. Оскільки ґрунтоцемент розглянуто також як зміцнений ґрунт, то

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

для оцінювання його водостійкості потрібно визначати коефіцієнт розм'якливості у воді. За коефіцієнтом розм'якливості ґрунти поділяють на нерозм'якшувальні ($K_p \geq 0,75$) та розм'якшувальні ($K_p \leq 0,75$).

Із метою дослідження водостійкості ґрунтоцементу було виготовлено дослідну партію зразків такого складу: кількість цементу – 20 % від ваги сухого ґрунту, водоцементне відношення розчину – $V/C = 0,8$. Ґрунт використано лесовий. Виготовлено 6 зразків-кубів розміром $7,07 \times 7,07 \times 7,07$ см. Зразки було поділено на дві серії по 6 штук. Зразки першої серії зберігали протягом 28 діб у воді, зразки другої серії зберігали протягом 28 діб у повітряно-сухих умовах. Через 28 діб зразки випробовували на міцність під час стискання. Результати випробувань наведено в табл. 10.

Таблиця 10

Визначення водостійкості зразків ґрунтоцементу

Table 10

**Determination of water resistance
of soil cement samples**

№	$f_{cm}^{сух}$, МПа	f_{cm}^w , МПа	K_p	Висновок про водостійкість
1	4,1	4,3	1,0	>0,75 водостійкий
2	3,85	3,5	0,91	>0,75 водостійкий
3	3,6	3,1	0,86	>0,75 водостійкий
4	4,25	3,85	0,91	>0,75 водостійкий
5	3,75	3,4	0,91	>0,75 водостійкий
6	3,56	4,0	1,12	>0,75 водостійкий
	3,85	3,7	0,95	>0,75 водостійкий

За результатами випробувань (табл. 10) для кожного зразка визначено границю міцності в разі стискання у водонасиченому стані та повітряно-сухому. Також для отриманих значень міцності ґрунтоцементу проведено статистичну обробку даних методом найменших квадратів. Коефіцієнт варіації для зразків, що зберігалися у повітряно-сухих умовах, склав $C_v = 0,05$; для зразків, що зберігалися у воді, – $C_v = 0,09$. Отримані дані свідчать про однорідність ґрунтоцементу як матеріалу та високу точність проведення експерименту, що підтверджують дані випробувань [5].

За даними табл. 10 коефіцієнт розм'якливості, який визначають як відношення середніх значень границь міцності на стиск у водонасиченому та повітряно-сухому стані, для зразків ґрунтоцементу, виготовленого шляхом перемішування суглинку з кількістю цементу 20 % від ваги сухого ґрунту, становить 0,95, тому ґрунтоцементний елемент можна віднести до водостійкого.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі встановлено можливість використання вертикальних армувальних елементів із ґрунтоцементу з необхідними технологічними та експлуатаційними показниками, отриманих за бурозмішувальною технологією, для підсилення земляного полотна із врахуванням напружено-деформованого стану і морфології ґрунтових основ. Авторка на базі проведеного дослідження здійснила спробу підібрати складові компоненти і розробити оптимальні склади ґрунтоцементу для підсилення ґрунтового полотна під залізничну колію. Також розглянуто напрями модифікації ґрунтоцементну мінеральними і хімічними добавками.

Отримані результати можливість отримати ґрунтоцементні елементи оптимального складу і властивостей для вертикального підсилення ґрунтових основ під залізничну колію.

Висновки

У ході експериментальних досліджень:

1. Виконано вибір складових компонентів і отримано ґрунтоцементний елемент для підсилення ґрунтових основ із фізико-механічними характеристиками, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

2. Одним із ефективних напрямів отримання вертикальних армувальних елементів і зниження вартості під час підсилення й укріплення земляного полотна є використання як матеріалу суміші ґрунту з додаванням цементу в кількості 20..30 % за водоцементного відношення 0,8 в разі застосування бурозмішувальної технології.

3. Встановлено вимоги до складових компонентів ґрунтоцементних елементів за різних умов роботи.

4. Для модифікування структури ґрунтоцементу й мінімізації витрати цементу, запропоновано застосовувати як модифікувальні компоненти підсилення фіброві волокна. Для збільшення щільності, тріщиностійкості, міцності і модуля деформативності, поліпшення пластичності суміші рекомендовано використання хімічних модифікаторів до 0,3 % і для економії цементу – часток тонкодисперсних відходів промисловості у вигляді меленого шлаку чи відсіву каменеподрібнення в кількості 20...30 %.

5. Встановлено оптимальне співвідношення цементу з ґрунтом, вмісту модифікувальних компонентів складу ґрунтоцементного розчину

залежно від властивостей і складу ґрунту із врахуванням його напружено-деформованого стану.

Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проведено за підтримки гранту Національного фонду досліджень України під час реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блашук Н. В., Маєвська І. В., Гончарук М. С. Використання золи виносення у складі ґрунтоцементу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. Т. 29, № 2. С. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65>
2. ВСН-40-88. *Проектування і влаштування фундаментів із цементогрунту для малоповерхових сільських будинків*. Київ, 1989. 13 с.
3. Слісєєва М. О., Бабенко М. М., Савицький М. В., Стоун К., Піпа В. В. Глинисті ґрунти Придніпровського регіону для ґрунтобетону. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 99. С. 71–77.
4. Зоценко М. Л. Ґрунтоцементні палі, що виготовляються бурозмішувальним методом. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2013. Вип. 3 (38), Т. 2. С. 110–122.
5. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. *Бурові палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом*: монографія. Харків : «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с.
6. Зоценко Н. Л., Петраш Р. В., Петраш О. В. Контроль за якістю ґрунтоцементних елементів, які виготовлені за бурозмішувальною технологією. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2010. Вып. 56. С. 188–193.
7. Крисан В. І. *Дослідження напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, армованого ґрунтоцементними елементами, що виготовлені по струминно-змішувальній методиці* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Полтава : ПолтНТУ, 2010. 24 с.
8. Ларцева І. І. *Закріплення зсувонебезпечних територій за допомогою цементациї за бурозмішувальною технологією* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Полтава : ПолтНТУ, 2010. 21 с.
9. Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (34), Т. 2. С. 171–177.
10. Петраш Р. В. *Спільна робота ґрунту та елементів армування, які виготовлені за бурозмішувальною технологією* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Полтава : ПолтНТУ, 2009. 20 с.
11. Петруняк М. В. Методика виготовлення та дослідження ґрунтоцементу в лабораторних умовах. *Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34), Т. 2. С. 184–189.
12. Троян В. В. *Добавки для бетонів і будівельних розчинів*. ТОВ «Видавництво» «Аспект-Поліграф», 2010. 228 с.
13. Тютькін О. Л., Громова О. В. Обґрунтування вибору складових компонентів і методу отримання ґрунтоцементного елемента для підсилення земляного полотна. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 24. С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2023/292006>
14. Fan J., Wang D., Qian D. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10. Iss. 4. P. 791–797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004>

O. V. HROMOVA^{1*}

^{1*}Dep. «Architectural Design, Landscaping and Building Materials», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 304 73 33, e-mail o.v.hromova@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

Selection of Components and Methods of Modification of Soil Cement to Improve the Performance Properties of Subgrade

Purpose. The main objective of the scientific article is a reasonable selection of soil-cement reinforcing structural elements and methods of modifying the soil-cement structure to strengthen the subgrade for railroad tracks. **Methodology.** For the construction of soil-cement reinforcing elements for a combined railway track using drilling and mixing technology, a number of tasks were solved, including: a reasonable selection of the components and modifiers of the soil-cement element; determination of the properties of the components; establishment of operational requirements for soil-cement and its composition; design of optimal compositions with specified performance characteristics, taking into account the properties of soils and operating modes. **Findings.** The influence of soil-cement components on the rheological properties of soil-cement mixtures and the physical and mechanical properties of soil-cement was studied. Based on the data processing by statistical analysis, the optimal content of the constituent components of soil-cement mixtures was selected to ensure the technological and operational performance of soil-cement for different types of soils and to strengthen the soil base during track construction. The influence of mineral granular, fibrous and chemical modifiers on the properties of soil cement was investigated. **Originality.** The possibility of using vertical reinforcing elements made of soil cement with the necessary technological and operational parameters obtained by drilling and mixing technology to strengthen the subgrade, taking into account the stress-strain state and morphology of the soil bases, has been determined. Based on the study, the author made an attempt to select the components and develop optimal soil cement compositions for strengthening the subgrade of a railroad for a combined track. The directions of modification of soil cement with mineral, fiber and chemical additives are also considered. **Practical value.** The study makes it possible to obtain soil-cement elements of optimal composition and properties for different types of soils and stress-strain states in order to vertically strengthen the soil bases for the railway track. To modify the structure of soil cement and minimize cement consumption, it is proposed to use fiber fibers as modifying reinforcement components. To increase the density, crack resistance, strength, and modulus of deformability and improve the plasticity of the mixture, it is recommended to use chemical modifiers up to 0.3 % and to save cement – particles of fine industrial waste in the form of ground slag or stone grinding screenings in the amount of 20...30 %.

Keywords: soil cement; soil-cement pile; drilling and mixing technology; modifier; soil base; subgrade; soil; cement

REFERENCES

- Blaschuk, N., Maevska, I., & Goncharuk, M. (2021). Use of assembly ash in the composition of soil cement. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 29(2), 51-65. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65> (in Ukrainian)
- Proektuvannia i vlashtuvannia fundamentiv iz tsementohruntu dlia malopoverkhovykh silskykh budynkiv VSN-40-88*. (1989). Kyiv. (in Ukrainian)
- Yelisieieva, M. O., Babenko, M. M., Savytskyi, M. V., Stone, C., & Pipa, V. V. (2017). Clay soils of the prydniprovsk region for earthconcrete. *Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye*, 99, 71-77. (in Ukrainian)
- Zocenko, M. L. (2013). Soil-cement piles, manufactured by boring-mixing method. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 3((38)2), 110-122. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Vinnikov, Y. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi pali, yaki vyhotovliautsia za burozmishuvalnym metodom: monohrafiia*. Kharkiv : «Drukarnia Madryd». (in Ukrainian)
- Zotsenko, N. L., Petrash, R. V., & Petrash, O. V. (2010). Kontrol' za yakystyu hruntotsementnykh elementiv, yaki vyhotovleni za burozmishuval'noyu tekhnolohiye. *Construction, Materials Science, Mechanical Engineering*, 56, 188-193. (in Ukrainian)
- Krysan, V. I. (2010). *Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu gruntovoho masyvu, armovanoho gruntotse-mentnymi elementamy, shcho vyhotovleni po strumynno-zmishuvalnii metodytsi* (Extended abstract of PhD dissertation). Poltava: PolNTU. (in Ukrainian)

8. Lartseva, I. I. (2010). *Zakriplennia zsuvo nebezpechnykh terytorii za dopomohoiu tsementatsii za burozmishuvalnoiu tekhnolohiieiu* (Extended abstract of PhD dissertation). Poltava: PoltNTU. (in Ukrainian)
9. Novitskiy, O. P. (2012). Influence of plasticizing additions for strength of soil-cement. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 4((34)2), 171-177. (in Ukrainian)
10. Petrash, R. V. (2009). *Spilna robota gruntu ta elementiv armuvannia, yaki vyhotovleni za burozmishuvalnoiu tekhnolohiieiu* (Extended abstract of PhD dissertation). Poltava: PoltNTU. (in Ukrainian)
11. Petrunyak, M. V. (2012). Method of preparation and study of soil-cement under laboratory conditions. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 4((34)2), 184-189. (in Ukrainian)
12. Troian, V. V. (2010). *Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv*. TOV «Vydavnytstvo» «Aspekt-Polihraf» (in Ukrainian)
13. Tiutkin, O. L., & Hromova, O. V. (2023). Substantiating the concepts of components composition and method of obtaining soil-cement element for reinforcement of embankments. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 24, 81-92. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/292006> (in Ukrainian)
14. Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791-797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.08.2024

Прийнята до друку: 24.12.2024

УДК [711.168:623.687]-044.922

Г. П. ІВАНОВА^{1*}, В. Є. ОЛІШЕВСЬКА^{2*}, С. М. ГАПСЄВ^{3*}, С. О. ОЛІШЕВСЬКА^{4*}

^{1*}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

^{2*}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 olishevsk.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

^{3*}Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 36 20 447, ел. пошта harpieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

^{4*}Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 482 36 14, ел. пошта Olishevsk.s.o@nmu.one, ORCID 0000-0003-0821-1091

Будівельна галузь України: трансформації та перспективи в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови

Мета. Воєнні дії викликали серйозні зміни в економічній сфері в усіх регіонах країни. Переживає великі трансформації та виклики і будівельна галузь. Основною метою роботи є аналіз сучасних тенденцій у сфері будівельного ринку України, його особливостей та майбутнього в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови країни. **Методика.** Повномасштабне вторгнення призвело майже до колапсу будівельної галузі, велика частина українських підприємств була змушена призупинити або обмежити виробництво, частина переорієнтувалась на потреби ЗСУ. Багато підприємств на Півдні та Сході країни опинились у зоні активних бойових дій або в тимчасовій окупації, – так само, як і елементи логістики, постачальники сировини та комплектуючих. Ушкодження інженерної інфраструктури також негативно відобразилося на виробництві будівельної продукції. Велику частину сировини і будівельних матеріалів доводиться імпортувати, але обсяги імпорту теж обмежені, оскільки портова інфраструктура практично не працює. Протягом дії воєнного стану уряд прийняв ряд постанов, щоб спростити ввезення окремих товарів, але багато будівельних матеріалів усе ще не потрапили до переліків. Також відбувається імпортозаміщення і перебудова логістики після відмови від товарів з недружніх країни, що раніше переважали в таких сегментах, як ринок скловати, бітуму та інших. Розглянуто досвід інших країн щодо захисту будівельних об'єктів від руйнування під час воєнних дій. **Результати.** Проаналізовано стан внутрішнього ринку та проблеми імпорту будівельних матеріалів; кадрове забезпечення будівельної галузі; зміни структури та обсягів попиту у сфері будівництва і нерухомості; зміни в містобудівному законодавстві, а також стан транспортної інфраструктури; підготовку до повоєнної відбудови. **Наукова новизна.** Проведено комплексний аналіз стану будівельної галузі України під час збройної агресії. Розглянуто важливість упровадження нових стандартів безпеки і цивільного захисту під час зведення будівельних об'єктів, полегшення оформлення дозвільної документації, розвиток Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва. **Практична значимість.** Виділено напрямки будівництва та транспортної інфраструктури, які можна розвивати навіть під час воєнного стану, розглянуто основні проблеми будівельної галузі України.

Ключові слова: будівництво промислових та цивільних об'єктів під час воєнного стану в Україні; будівельні матеріали; стандарти безпеки; цивільний захист; мости; транспортна інфраструктура; повоєнна відбудова; відбудова транспортної інфраструктури

Вступ

На сьогодні загальні втрати України внаслідок російської агресії становлять понад \$150 млрд, у тому числі найбільших збитків зазнав житловий фонд (\$56 млрд), інфраструктура (\$37 млрд) та промисловість (\$12 млрд) [11]. За два роки повномасштабного вторгнення близько

15 % виробничих будівельних потужностей зазнали руйнувань. У 2022 році обсяг будівельного ринку України зменшився приблизно на 65 % [9]. У 2023 році спостерігається тенденція до збільшення споживання будівельної продукції та послуг і, за результатами року, зростання ринку на 25 %. При цьому, за прогнозами, обсяг

ринку житлової нерухомості у гривневому еквіваленті мав залишитися на рівні минулого року, нежитлової нерухомості – зрости на 15 %, а інженерних споруд – показати приріст 40 %. Серед основних новацій у законодавчій сфері останніх років можна відзначити тенденцію до підвищення безпеки людей та поліпшення енергоефективності будівель [12]. Так, зміни до Закону № 2486-IX регламентують вимоги до влаштування бомбосховищ під час зведення нових будівель [3, 7].

Забезпечення будівельного ринку України суттєво залежить від автомобільного транспорту, який належить до критичної інфраструктури (автотранспортні підприємства, автомобільні транспортні засоби, дороги, мости та ін.) [4]. Серед основних послуг автомобільного транспорту – вантажні та автобусні перевезення, нове будівництво, реконструкція, капітальний ремонт, послуги з експлуатаційного утримання та поточного ремонту автомобільних доріг та штучних споруд, що на них розміщені [4].

Наразі роль автомобільного транспорту, який виконує важливі економічні та соціальні завдання, ще більше зростає. Але об'єкти критичної інфраструктури стали другим сектором (після житлових будівель), який зазнав найбільших руйнувань, пошкодження або порушення функціонування.

На початок вересня 2023 р. загальна сума збитків на транспорті склала 36,6 млрд дол. США [10].

Станом на серпень 2024 р. руйнувань зазнали 25,4 тис. км автомобільних доріг, із них 8,9 тис. км – дороги державного значення, 8,6 тис. км – дороги місцевого значення, 7,9 тис. км – комунальні дороги, 344 мости та мостові переходи загальною протяжністю 87,5 тис. м [11].

Доцільно врахувати міжнародний досвід захисту будівельних об'єктів від руйнування під час воєнних дій та аналізу будівельного ринку під час воєнного стану [13, 16, 17].

Міжнародні фінансові інституції планують долучатися до відбудови і поступово виходять на ринок України. Ключовими критеріями фінансування повоєнного будівництва в Україні будуть прозорість та швидкість реалізації проєктів, тому міжнародні організації вже сьогодні починають налагоджувати партнерство з надійними українськими будівельниками.

Мета

Основною метою роботи є аналіз актуальних тенденцій у сфері будівельного ринку України, його особливостей та майбутнього в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови з урахуванням досвіду інших країн щодо захисту будівельних об'єктів від руйнування під час воєнних дій, а також забезпечення відбудови об'єктів транспортної інфраструктури, яка має суттєвий вплив на розвиток будівництва.

Методика

Україна майже три роки перебуває у воєнному стані, що значно впливає на будівельну галузь. Основні проблеми, які сьогодні виникають у будівельній галузі:

- скорочення внутрішнього ринку будівельних матеріалів;
- проблеми з імпортуванням будівельних матеріалів;
- дефіцит кадрів;
- зростання собівартості будівництва;
- форс-мажорні обставини;
- зміна структури та обсягів попиту у сфері будівництва й нерухомості;
- зміна потенційних покупців та особливості вибору ними житла;
- зміни в містобудівному законодавстві;
- труднощі перевезення будівельних матеріалів;
- підготовка до повоєнної відбудови.

Вирішення цих проблем наразі є надзвичайно актуальним.

Результати

Скорочення внутрішнього ринку будівельних матеріалів та проблеми з їх імпортуванням. Із початком повномасштабного вторгнення велика частина українських підприємств була змушена призупинити або обмежити виробництво, частина переорієнтувалась на потреби ЗСУ. Енергетична криза, зокрема ушкодження інженерної інфраструктури, також негативно позначилося на виробництві будівельної продукції.

Галузь відчула гострий дефіцит сировини і будівельних матеріалів: скла, металовиробів, будівельних сумішей, цегли тощо [8].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Зараз спостерігається скорочення внутрішнього ринку будівельних матеріалів через такі фактори:

- зниження виробництва;
- обмеження на зовнішні поставки;
- послаблення попиту;
- зростання цін;
- зміни в асортименті.

Велику частину сировини й будівельних матеріалів доводиться імпортувати, але обсяги імпорту теж обмежені, оскільки портова інфраструктура практично не працює. Хоча протягом воєнного стану уряд прийняв ряд постанов, щоб спростити ввезення окремих товарів [5], але багато будматеріалів усе ще не потрапили до переліків. Також відбувається імпортозаміщення і перебудова логістики після відмови від товарів із країни-агресора та її сателітів, які раніше переважали в таких сегментах, як ринок скловати, бітуму [2].

Дефіцит кадрів та зростання собівартості будівництва. Відбулося скорочення кількості кваліфікованого персоналу в галузі через мобілізацію й еміграцію за кордон.

Частина проєктних і підрядних організації припинили або скоротили свою діяльність, а дефіцит персоналу візначають практично всі учасники ринку (рис. 1).

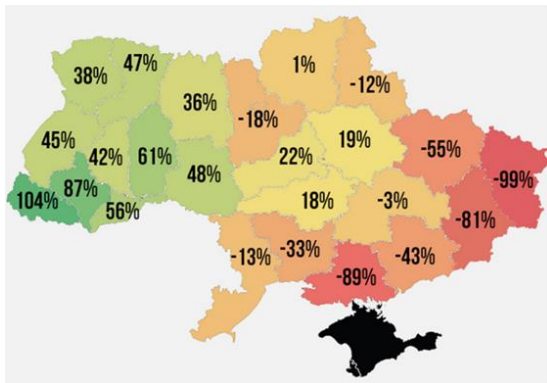


Рис. 1. Зміна кількості вакансій за областями порівняно з періодом до повномасштабного вторгнення

Fig. 1. Change in the number of vacancies by region compared to the period before the full-scale invasion

Наразі будівельна галузь стикається зі значними проблемами в забезпеченні кадрами:

- відтік робочої сили через війну;
- обмеженість навчальних програм;

- зменшення привабливості галузі;
- потреба у спеціалізованій кваліфікації.

Зростання собівартості зумовлене, не в останню чергу, вищезгаданими чинниками – подорожчанням ресурсів на фоні їх дефіциту (що стосується як вартості будівельних матеріалів, так і власне людських ресурсів) (рис. 2).

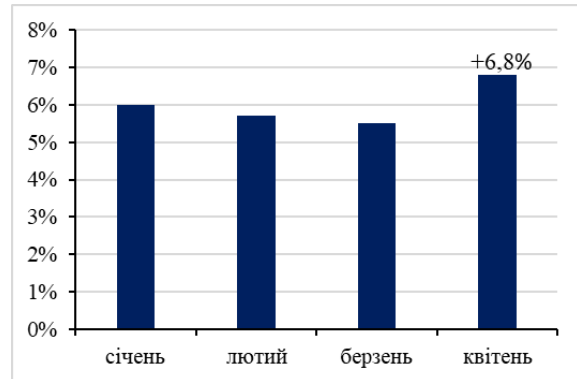


Рис. 2. Зміна цін на будівельні матеріали навесні 2023 року

Fig. 2. Changes in prices for building materials in the spring of 2023

Будівельна галузь також стикається зі зростанням собівартості будівництва через такі фактори:

- підвищення цін на будівельні матеріали;
- збільшення витрат на оплату праці;
- потребу в додатковій інфраструктурі та заходах безпеки;
- ризик і нестабільність.

Форс-мажорні обставини. Наприкінці 2022 року до обстрілів, руйнувань, порушення логістики додалась ще одна форс-мажорна обставина – відсутність світла, що позначилася і на галузі будівництва.

Під час воєнного стану в Україні будівельна галузь потрапляє в числені форс-мажорні обставини, які важко передбачити і врахувати в планах будівництва. Ось деякі з них:

- безпека та стабільність;
- обмеження доступу до ресурсів;
- підвищення цін та витрат;
- пошкодження інфраструктури;
- втрати та збитки.

Зміни структури та обсягів попиту у сфері будівництва й нерухомості. Із початком повномасштабного вторгнення будівництво по всій країні зупинилося, але з другого півріччя

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

2022 року на віддалених від фронту і на звільнених територіях роботи поступово почали відновлюватися (рис. 3, 4).

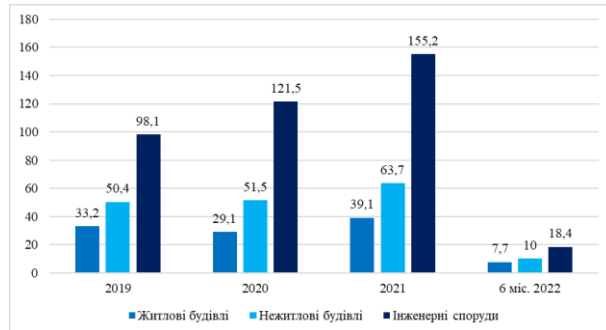


Рис. 3. Обсяг виконаних будівельних робіт за типами будівель і споруд в Україні, 2019 – 6 міс. 2022 рр., млрд грн

Fig. 3. Volume of construction works performed by types of buildings and structures in Ukraine, 2019 – 6 months. 2022, UAH billion

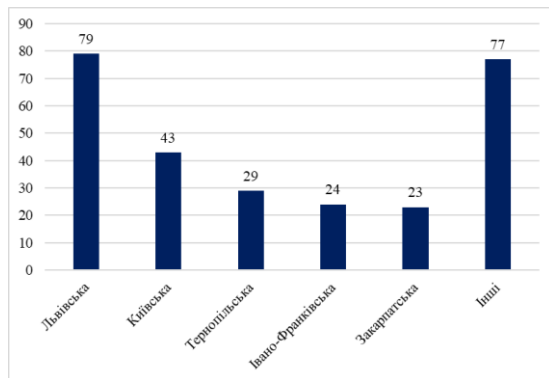


Рис. 4. Кількість нових житлових комплексів, які почали будувати після в Україні 24.02.2022 р. за регіонами, од.

Fig. 4. Number of new residential complexes that started construction after 02/24/2022 in Ukraine by region, units

Це пов'язано як з об'єктивними, так і з певними психологічними чинниками: в умовах невизначеності як забудовники, так і покупці не надто схильні до значних інвестицій. Серед основних напрямів будівництва, які розвиваються навіть під час воєнного стану, можна виділити такі:

- відновлення пошкоджених будівель та об'єктів інфраструктури [1];
- житлове будівництво, у тому числі будівництво житла для внутрішньо переміщених осіб;

– промислове будівництво і переоснащення підприємств, що стимулюється зміною місця розташування виробництв і змінами в логістиці;

– будівництво об'єктів цивільного захисту, військового і подвійного призначення, захист об'єктів інфраструктури.

Зміна потенційних покупців. З одного боку, купівельна спроможність населення значно зменшилася, а з іншого – навіть за наявності коштів, в умовах невизначеності, покупці рідко наважуються інвестувати в нерухомість, частина потенційних покупців займає вичікувальну позицію.

Під час повномасштабного вторгнення в Україну відбувається зміна потенційних покупців у будівельній галузі через різні обставини. Ось деякі цікаві факти про цю ситуацію:

– збільшення попиту на житло в безпечних регіонах;

– потреба в пристосуванні будівель для потреб військових чи гуманітарних організацій;

– зменшення попиту на розкішне житло;

– підвищений інтерес до безпечних житлових комплексів та котеджних містечок.

Нові особливості вибору житла покупцями.

Воєнні дії змусили людей більш виважено ставитись до інвестицій у нерухомість. Ті, хто все ж наважується на купівлю житла, надають перевагу готовим квартирам або житлу з високим ступенем готовності, переважно в західних та центральних регіонах України або в Києві.

Наразі під час купівлі житла покупці почали звертати увагу на такі аспекти:

1) наявність у будинку автономної або резервної інженерної інфраструктури (власна котельня, генератори для місць загального користування, додаткові вводи електроенергії тощо);

2) більшим попитом користуються нижні поверхи як із точки зору безпеки, так і доступності на випадок вимкнення світла;

3) наявність у будинку сховища, укріпленого підвалу з кількома виходами і санвузлами;

4) перевагу, як правило, надають квартирам із меншою квадратурою – функціональним і дешевшим, що мають меншу вартість обслуговування.

Зміни в містобудівному законодавстві. Реформування містобудівної галузі триває і під час воєнного стану. Із початку повномасштабного вторгнення прийнято безліч нормативно-право-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вих актів у містобудуванні, частина з яких регулює правові відносини на час воєнного стану, а інша буде діяти й після його завершення.

У пріоритеті – відбудова країни, втілення нових стандартів безпеки і цивільного захисту, полегшення оформлення дозвільної документації, поглиблення цифрових технологій і подальший розвиток Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва, що має сприяти прозорості, законності та усуненню корупційної складової.

Актуальні стратегічні цілі. Такими цілями є забезпечення відбудови об'єктів транспортної інфраструктури, яка має суттєвий вплив на розвиток будівництва; інтеграція та кластеризація автотранспортних підприємств; упровадження інноваційних технологій, які сприяють створенню екологічного транспорту, цифровізацію та використання штучного інтелекту; удосконалення мультимодальних моделей перевезення [6].

Відбудова транспортної інфраструктури передбачає:

- вкладення великих обсягів ресурсів для відновлення з урахуванням масштабів руйнувань;
- залучення міжнародних фінансових організацій для фінансування проєктів відновлення;
- співпрацю з міжнародними організаціями для впровадження сучасних технологій та стандартів;
- забезпечення координації між різними секторами економіки для ефективного використання ресурсів;
- використання принципів «Build Back Better», тобто не тільки відновлення, але й поліпшення якості будівель та інфраструктури з урахуванням сучасних стандартів [11].

Наукова новизна та практична значимість

Проведено комплексний аналіз не тільки будівельного ринку України, але й транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану, що дозволяє виявити специфічні особливості, тенденції розвитку та виклики.

Будівництво в Україні під час дії воєнного стану відбувається в складних умовах, які накладають свої особливості і вимоги на будівельну індустрію:

1. Безпека. Першочерговим пріоритетом під час будівництва в прифронтовій зоні є безпека робочої сили. Це означає, що будівельні проєкти мають бути ретельно сплановані і виконані з урахуванням можливих загроз та ризиків.

2. Особливі вимоги до інфраструктури. У зоні бойових дій можуть бути пошкоджені або зруйновані інфраструктурні об'єкти, такі як автопідприємства, дороги, мости, електромережі тощо. Тому будівництво нових або відновлення пошкоджених інфраструктурних об'єктів є надзвичайно важливим завданням [14, 15].

3. Економічні обмеження. Воєнний стан може призвести до скорочення бюджетних коштів, виділених на будівництво. Це може зменшити обсяги та швидкість виконання будівельних проєктів.

4. Необхідність швидкості та мобільності. Умови воєнного стану можуть вимагати швидкого введення в експлуатацію нових будівель або реконструкцію наявних, що потребує використання швидких та мобільних методів будівництва.

5. Виклики, пов'язані з ресурсами. Умови воєнного стану можуть призвести до труднощів із постачанням будівельних матеріалів та обладнання. Це може вимагати знаходження альтернативних джерел постачання або використання місцевих ресурсів.

6. Соціальні та гуманітарні аспекти. Будівництво в прифронтовій зоні також може передбачати гуманітарні проєкти, такі як відновлення житлових будівель для внутрішньо переміщених осіб або надання засобів до існування населенню.

Висновки

Проведений аналіз показав, що, незважаючи на труднощі, країна має потенціал для відновлення та розвитку будівельного ринку. Це потребує ефективної державної політики, спрямованої на підтримку інвестицій і відбудову інфраструктури.

Можливі такі напрямки розвитку будівельної галузі в умовах воєнної агресії:

- реконструкція та відновлення інфраструктури: після закінчення бойових дій буде необхідно відновлювати пошкоджені будівлі, дороги, мости, інші об'єкти інфраструктури. Це може

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

стати значним джерелом робочих місць і стимулювати розвиток будівельної галузі;

– зміна споживчих пріоритетів: під впливом воєнного стану може змінитися споживчий попит на житло, комерційні приміщення та інші типи будівель. Наприклад, попит на житло в містах, які не постраждали від війни, може зрости, у той час як попит на будівництво торгових центрів у прифронтовій зоні може зменшитися;

– залучення інвестицій: після закінчення воєнного стану може відбутися масштабне залучення інвестицій у будівельний сектор для відновлення інфраструктури та розвитку нових об'єктів.

Загалом майбутнє будівельної галузі в Україні під час воєнного стану буде залежати від багатьох факторів, включаючи тривалість бойових дій, зміни в економічній ситуації та вплив міжнародних факторів.

Планування відбудови країни доцільно починати, не чекаючи завершення бойових дій. Про-

цес уже розпочався зі створення «Плану відновлення України», у рамках якого визначено перелік Національних програм для досягнення ключових результатів. «U-LEAD з Європою» розпочав надання підтримки 24 відібраним громадам у розробці «Програм комплексного відновлення території» та «Планів відновлення та розвитку громади». Програма комплексного відновлення території – це аналітично-просторовий документ, який визначає основні містобудівні та соціально-економічні пріоритети політики відновлення території, постраждалої внаслідок збройної агресії. Аналіз будівельного ринку України в контексті міжнародного досвіду може допомогти в розробці стратегій відновлення, основаних на кращих практиках інших країн, які пережили подібні кризи.

Подальші дослідження в цій сфері є необхідними для більш глибокого розуміння динаміки будівельної галузі в умовах воєнного стану та розробки рекомендацій для її стабільного розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабаєв В. М., Рищенко Т. Д., Завальний О. В., Чепурна С. М., Жидкова Т. В., Шишкін Е. А., Керш В. Я., Гайко Ю. І., Вяткін К. І. *Реконструкція цивільних та промислових будівель і споруд*: підручник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 404 с.
2. Далик В., Запісоцький І. Експортний потенціал будівельної індустрії України. *Академічні візії*. 2023. Вип. 21. С. 1–10.
3. *Деякі питання здійснення дозвільних та реєстраційних процедур у будівництві в умовах воєнного стану*: Постанова Кабінету Міністрів України від 24 червня 2022 р. № 722. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722-2022-%D0%BF#Text>
4. *Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури*: Постанова Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 р. № 1109. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
5. Жува М. Тенденції в будівельній галузі під час воєнного стану. Як війна впливає на будівельну галузь. *PRO InfoBud*^{UA}. 2023. URL: <https://clcgroupp.com.ua/blog/tendenciyi-v-budivelnij-galuzi-pid-chas-voennogo-stanu/>
6. Паливода О. М. Стратегії розвитку транспортних підприємств України в умовах Європейської інтеграції та війни. *Бізнес Інформ*. 2023. № 8. С. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-8-185-192>
7. *Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо забезпечення вимог цивільного захисту під час планування та забудови території*: Закон України від 29.07.2022 р. № 2486-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2486-20#Text>
8. Романенко О. В. Розвиток ринку будівельних матеріалів України в умовах воєнного стану. *Ефективна економіка*. 2024. № 3. С. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.3.46>
9. Скриньковський Р. М., Цюх С. І., Процевят О. С., Тиркало Ю. Є., Горбонос Ф. В. Тенденції і проблеми у сфері будівництва України в умовах війни. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: Економічні науки*. 2022. № 7 (63). С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2022-7-8146>
10. Собкевич О. В., Шевченко А. В., Русан В. М., Белашов Є. 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. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/ad_realsektor-2023.pdf

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

11. Структурні зміни та виклики в будівельній індустрії України: аналіз та прогнози. 2024. 111 с.
URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_vikliki_v_budivelnii--_industrii--.pdf
12. Тригуб Р. М., Бондаренко О. Ю., Довбуш В. А. Сучасний стан ринку житла в Україні. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2021. № 16. С. 212–218.
DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-26)
13. Czarnecki B., Chodorowski M. P. Urban Environment during Post-War Reconstruction: Architectural Dominants and Nodal Points as Measures of Changes in an Urban Landscape. *Land*. 2021. Vol. 10. Iss. 10. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10101083>
14. Ivanova H. P., Hapiev S. M., Shapoval V. H., Zhabchuk K. S., Zhylinska, S. R. *Stability problems of large sized multi elements rod structures*: monograph. Petroșani : UNIVERSITAS Publishing, 2021. P. 405–427.
DOI: <https://doi.org/10.31713/m1025>
15. Shashenko O., Shapoval V., Skobenko O., Morklianyk B., Barsukova, S. *Construction and design of buildings and structures under martial law. New challenges and ways to address them*: monograph. Petroșani : UNIVERSITAS Publishing, 2024. P. 515–540. DOI: <https://doi.org/10.31713/m1327>
16. Tortorici G., Fiorito F. Building in Post-war Environments. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 180. P. 1093–1102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.269>
17. Ullal A. Construction Conditions and Practices during War in Afghanistan. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2023. Vol. 149. Iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-12815>

H. P. IVANOVA^{1*}, V. YE. OLISHEVSKA^{2*}, S. M. HAPIEIEV^{3*}, S. O. OLISHEVSKA^{4*}

^{1*}Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D.Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 45 29 945, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{2*}Dep. of Automobiles and Automobile Economy, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail olishevska.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

^{3*}Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 36 20 447, e-mail hapieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

^{4*}Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D.Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050)482 36 14, e-mail olishevska.s.o@nmu.one, ORCID 0000-0003-0821-1091

Construction Industry in Ukraine: Transformations and Prospects in the Context of Martial Law and Postwar Reconstruction

Purpose. Military actions have caused serious changes in the economic sphere in all regions of the country. The construction industry is also experiencing major transformations and challenges. The main purpose of the study is to analyze current trends in the construction market of Ukraine, its features and future in the context of martial law and post-war reconstruction. **Methodology.** The full-scale invasion led to the near collapse of the construction industry, most Ukrainian enterprises were forced to suspend or limit production, and some reoriented to the needs of the Armed Forces. Many companies in the South and East of the country were in the area of active hostilities or under temporary occupation, as were logistics elements and suppliers of raw materials and components. Damage to the engineering infrastructure also had a negative impact on the production of construction products. Most of the raw materials and construction materials have to be imported, but the volume of imports is also limited, as the port infrastructure is practically non-existent. During the martial law period, the government adopted a number of decrees to facilitate the import of certain goods, but many construction materials are still not on the list. Import substitution and logistics restructuring are also taking place after the abandonment of goods from unfriendly countries that previously dominated such segments as the glass wool, bitumen, and other markets. The experience of other countries in protecting construction facilities from destruction during military operations is considered. **Findings.** The article analyzes the state of the domestic market and the problems of imports of building materials; staffing of the construction industry; changes in the structure and volume of demand in the construction and real estate sectors; changes in urban planning legislation, as well as the state of transport infrastructure; preparation for post-war reconstruction. **Originality.** A comprehensive analysis of the state of the construction industry of Ukraine during the armed aggression is carried out. The importance of introducing new safety and civil protection standards in the construction of construction projects, facilitating the issuance of permits, and developing the Unified State Electronic System in the field of construction is considered. **Practical value.** The article highlights the areas of construction and transport

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

infrastructure that can be developed even during martial law, and considers the main problems of the construction industry in Ukraine.

Keywords: construction of industrial and civilian facilities during martial law in Ukraine; building materials; safety standards; civil protection; bridges; transport infrastructure; post-war reconstruction; restoration of transport infrastructure

REFERENCES

1. Babaiev, V. M., Ryshchenko, T. D., Zavalnyi, O. V., Chepurna, S. M., Zhydkova, T. V., Shyshkin, E. A., Kersh, V. Ya., Haiko, Yu. I., & Viatkin, K. I. *Rekonstruksiiia tsyvilnykh ta promyslovykh budivel i sporud*: pidruchnyk. Kharkiv: O. M. Beketov NUUEKh. (in Ukrainian)
2. Dalyk, V. & Zapisots'kyi, I. (2023). Eksportnyy potencial budivel'noyi industriyi Ukrayiny. *Academic Visions*, 21, 1-10. (in Ukrainian)
3. *Deiaki pytannia zdiisnennia dozvilnykh ta reiestratsiinykh protsedur u budivnytstvi v umovakh voiennoho stanu*, No 722. (2022, 24 Jun.). Kabinet Ministriv Ukrayiny: Postanova. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722-2022-%D0%BF#Text> (in Ukrainian)
4. *Deiaki pytannia obektiv krytychnoi infrastruktury*, No 1109. (2020, 9 Oct.). Kabinet Ministriv Ukrainy: Postanova. Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/KP201109?an=449> (in Ukrainian)
5. Zhuzha, M. (2023). Tendentsii v budivelnii haluzi pid chas voiennoho stanu. Yak viina vplyvaie na budivelnu haluz. *PRO InfoBud^{UA}*. Retrieved from <https://clcgroup.com.ua/blog/tendenciyyi-v-budivelnij-galuzi-pid-chas-voyennogo-stanu/> (in Ukrainian)
6. Palyvoda, O. M. (2023). Growth Strategies for Transport Enterprises of Ukraine in the Conditions of European Integration and War. *Business Inform*, 8(547), 185-192. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-8-185-192> (in Ukrainian)
7. *Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo zabezpechennia vymoh tsyvilnoho zakhystu pid chas planuvannia ta zabudovy terytorii*, No 2486-IX. (2022, 29 Jul.). Verkhovna Rada Of Ukraine: Legislation of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2486-20#Text> (in Ukrainian)
8. Romanenko, O. V. (2024). Development of the construction materials market in ukraine under wartime conditions. *Efektivna ekonomika*, 3, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.3.46> (in Ukrainian)
9. Skrynkovskyy, R., Tsyuh, S., Protseviat, O., Tyrkalo, Y., & Horbonos, F. (2022). Trends and problems in the field of construction of ukraine in the war conditions. *International Scientific Journal «Internauka». Series: «Economic Sciences»*, 7(63), 63-71. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2022-7-8146> (in Ukrainian)
10. 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* Kyiv: NISD. Retrieved from https://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/ad_realsektor-2023.pdf (in Ukrainian)
11. *Strukturni zminy ta vyklyky v budivelnii industrii Ukrainy: analiz ta prohnozy* (2024). Retrieved from https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_viklyki_v_budivelnii--_industrii--.pdf (in English)
12. Tryhub, R. M., Bondarenko, O. Yu., & Dovbush, V. A. (2021). The current state of the housing market in Ukraine. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 16, 212-218. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-26) (in Ukrainian)
13. Czarnecki, B., & Chodorowski, M. P. (2021). Urban Environment during Post-War Reconstruction: Architectural Dominants and Nodal Points as Measures of Changes in an Urban Landscape. *Land*, 10(10), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10101083> (in English)
14. Ivanova, H., Hapieiev, S., Shapoval, V., Zhabchyk, K., & Zhylynska, S. (2021). *Stability problems of large sized multi elements rod structures*: monograph (pp. 405-427). Petroșani: UNIVERSITAS Publishing. DOI: <https://doi.org/10.31713/m1025> (in English)
15. Shashenko, O., Shapoval, V., Skobenko, O., Morklianyk, B., & Barsukova, S. (2024). *Construction and design of buildings and structures under martial law. New challenges and ways to address them*: monograph (pp. 515-540). Petroșani: UNIVERSITAS Publishing. DOI: <https://doi.org/10.31713/m1327> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

16. Tortorici, G., & Fiorito, F. (2017). Building in Post-war Environments. *Procedia Engineering*, 180, 1093-1102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.269> (in English)
17. Ullal, A. (2023). Construction Conditions and Practices during War in Afghanistan. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(5). DOI: <https://doi.org/10.1061/jcemd4.coeng-12815> (in English)

Надійшла до редколегії: 14.08.2024

Прийнята до друку: 16.12.2024

Тематичний покажчик журналу «Наука та прогрес транспорту»
за 2024 рік

Назва статті	№ журналу	Стор.
Автоматизовані системи управління на транспорті		
<i>В. В. МАЛОВІЧКО, Н. В. МАЛОВІЧКО, Р. В. РИБАЛКА</i> Створення математичної моделі станційного рейкового кола у вигляді скінченного дискретного автомата	2	5
Екологія та промислова безпека		
<i>М. М. БІЛЯЄВ, П. Б. МАШИХІНА, Р. П. ПОБЕДЬОННИЙ, А. О. ЧІРКОВ, М. В. ЧИРВА</i> Математична модель аналізу кисневого режиму в біореакторі	1	5
<i>С. В. БОГАЧЕНКО, С. В. ШАТОВ</i> База даних для моніторингу технічного стану споруд, як складова частина промислової безпеки	1	13
<i>В. В. ОНИЩЕНКО, С. М. СУХАЙ</i> Особливості організаційних і технічних заходів щодо підвищення рівня живучості і вибухопожежобезпеки потенційно небезпечних об'єктів	1	20
<i>М. М. БІЛЯЄВ, І. В. КАЛАШНІКОВ, О. В. БЕРЛОВ, В. А. КОЗАЧИНА, В. М. ПОЛТОРАЦЬКА</i> Використання габіонів для захисту від ураження нафтосховища	2	12
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. В. КОЗАЧИНА</i> Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах	2	18
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. Д. ПЕТРЕНКО, В. В. БІЛЯЄВА, О. В. БЕРЛОВ, О. В. ЗВОНАРЬОВА</i> Математичне моделювання процесу формування кислотних дощів у разі викидів із ТЕС	2	26
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. В. КОЗАЧИНА</i> Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах	3	5
<i>В. В. БІЛЯЄВА, І. В. КАЛАШНІКОВ, О. В. БЕРЛОВ, О. І. ГУБІН, В. А. КОЗАЧИНА</i> Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації на залізничній станції	3	15
<i>М. М. БІЛЯЄВ, В. В. БІЛЯЄВА, О. В. БЕРЛОВ, В. А. КОЗАЧИНА, П. Б. МАШИХІНА</i> Швидка обчислювальна CFD-модель для прогнозування хімічного забруднення приміщення	4	5
<i>В. В. БІЛЯЄВА, С. А. ЩЕРБИНА</i> Математичне моделювання температурних полів у культивацийних спорудах	4	13
<i>В. Ю. УЛЬЯНОВ, В. В. БЛИК</i> До питання про наявність радонової активності тектонічних розломів півострова Катар	4	21

Назва статті	№ журналу	Стор.
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси		
<i>О. О. ГОЛОТА, А. М. МУХА, Д. В. УСТИМЕНКО, С. В. ПЛАКСІН</i> Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту	1	30
<i>В. М. КОВАЛЬОВ, Ю. В. КОВАЛЬОВА</i> Підвищення енергоефективності тягових електроприводів постійного струму	1	42
<i>Е. К. МАНАФОВ, Ф. Х. ГУСЕЙНОВ</i> Моделювання комплексної системи захисту тягових двигунів	1	51
<i>Є. М. ЧУПРИНА, А. М. МУХА, О. І. БОНДАР, С. В. ПЛАКСІН</i> Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля	3	23
Залізнична колія та автомобільні дороги		
<i>М. Б. КУРГАН, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Р. В. ІВАНОВ, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, В. С. ХМЕЛЕВСЬКИЙ</i> Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів	1	62
<i>М. Б. КУРГАН, А. М. КУРГАН, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Р. В. ІВАНОВ, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА</i> Модернізація наявних переїздів на напрямках будівництва в Україні залізничної колії європейського стандарту	4	31
<i>Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН</i> Оптимізація виправлення кривих у плані за допомогою комп'ютерного моделювання для підвищення безпеки руху поїздів	4	46
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання		
<i>Я. Д. ОСТАПЕЦЬ</i> Експериментальна оцінка ефективності використання візуальних міток для керування безпілотними транспортними засобами	2	34
<i>О. В. ГОРБОВА, Д. В. БОГУЦЬКИЙ</i> Контекстний аналіз сайту	3	32
Матеріалознавство		
<i>І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО, К. АСТАРОВ, Б. В. ЛИТВИНОВ, А. ОРАК, Н. УМУР</i> Вплив температури ізотермічного перетворення на структуру і властивості низьковуглецевої сталі	2	43
Машинобудування		
<i>В. М. БОГОМАЗ, В. Й. НАГАЧЕВСЬКИЙ, М. В. ПРИЙМАК</i> Аналіз впливу параметрів експлуатації машин на технічні характеристики елеватора в пункті чищення та миття парку техніким	3	40

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>О. С. КУРОП'ЯТНИК, О. Л. КРАСНОЦОК</i> Уточнення методики визначення характеристик канатних доріг	3	51
Рухомий склад і тяга поїздів		
<i>Г. Л. ВАТУЛЯ, А. О. ЛОВСЬКА, Є. С. КРАСНОКУТСЬКИЙ, П. В. РУКАВИШНИКОВ</i> Визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей під час експлуатаційних режимів навантаження	1	84
<i>А. Я. КУЗИШИН, В. В. КОВАЛЬЧУК</i> Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу	2	53
<i>Є. С. РЯБОВ, Б. Х. ЄРІЦЯН, І. М. КОЛОДІЙ, С. В. ІВАНОВ, О. А. СИЧ, А. В. ГАЛИЧ</i> Підвищення паливної ефективності магістрального тепловоза з роздільним навантаженням секцій	2	64
<i>А. Я. КУЗИШИН, В. В. КОВАЛЬЧУК, Н. В. КОСТІВ</i> Дослідження впливу хрестовини стрілочного переводу на вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу	3	63
<i>С. В. ПАНЧЕНКО, А. О. ЛОВСЬКА, М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ, П. В. РУКАВИШНИКОВ</i> Особливості проектування зйомного модуля для кріплення контейнерів у піввагонах	3	73
<i>А. Я. КУЗИШИН, В. В. КОВАЛЬЧУК, Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА</i> Просторова математична модель динамічної поведінки сучасного рухомого складу в умовах швидкісного руху	4	55
Транспортне будівництво		
<i>Д. О. БАННИКОВ, А. В. РАДКЕВИЧ, С. М. КОСЯЧЕВСЬКА</i> Зміни щодо нормативного визначення кліматичних навантажень і впливів на будівельні конструкції	1	92
<i>Д. С. СПІВАК, С. В. КЛЮЧНИК</i> Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху	1	105
<i>Л. І. КЛОЧКО</i> Несні сталеві конструкції для встановлення залізничних тензометричних ваг	2	80
<i>Є. А. МІСЮРА</i> Визначення ефективності сталевих конструкцій покриття складської будівлі	2	91
<i>С. О. ОЛІШЕВСЬКА</i> Огляд тенденцій виникнення зсувів у світі та в Україні	2	100

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>О. В. ГРОМОВА</i> Підбір складових та способи модифікації ґрунтоцементу з метою підвищення експлуатаційних властивостей земляного полотна	4	67
<i>Г. П. ІВАНОВА, В. Є. ОЛШЕВСЬКА, С. М. ГАПЄСВ, С. О. ОЛШЕВСЬКА</i> Будівельна галузь України: трансформації та перспективи в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови	4	80

Subject index to the journal «Nauka ta Progres Transportu = Science and Transport Progress» for 2024

Article title	Journal number	Page
Automated and Telematic Systems on Transport		
<i>V. V. MALOVICHKO, N. V. MALOVICHKO, R. V. RYBALKA</i> Creation of a Mathematical Model of a Stationary Rail Circuit in the Form of a Finite Discrete Automaton	2	5
Ecology and Industrial Safety		
<i>M. M. BILIAIEV, P. B. MASHYKHINA, R. P. POBIEDONNYI, A. O. CHIRKOV, M. V. CHYRVA</i> Mathematical Model of Oxygen Regime Analysis in a Bioreactor	1	5
<i>S. V. BOGACHENKO, S. V. SHATOV</i> Database for Monitoring the Technical Condition of Structures as an Integral Part of Industrial Safety	1	13
<i>V. V. ONISHCHENKO, S. M. SUKHAI</i> Features of Organizational and Technical Measures to Increase the Level Of Survivability and Explosion and Fire Safety of Potentially Dangerous Objects	1	20
<i>M. M. BILIAIEV, I. V. KALASHNIKOV, O. V. BERLOV, V. A. KOZACHYNA, V. M. POLTORATSKA</i> Using Gabions to Protect Oil Storage Facilities from Damage	2	12
<i>M. M. BILIAIEV, V. V. KOZACHYNA</i> Modeling of Non-Stationary Mass Transfer Process in Groundwater	2	18
<i>M. M. BILIAIEV, V. D. PETRENKO, V. V. BILIAIEVA, O. V. BERLOV, O. V. ZVONAROVA</i> Mathematical Modeling of the Process of Acid Rain Formation in Case of Emissions from Thermal Power Plants	2	26
<i>M. M. BILIAIEV, V. V. KOZACHYNA</i> Modeling of Filtration and Heat and Mass Transfer Processes in Groundwater	3	5
<i>V. V. BILIAIEVA, I. V. KALASHNIKOV, O. V. BERLOV, O. I. GUBIN, V. A. KOZACHYNA</i> Predicting the Consequences of an Emergency at a Railway Station Electric Transport, Power Systems and Complexes	3	15
<i>Y. M. CHUPRYNA, A. M. MUKHA, O. I. BONDAR, S. V. PLAKSIN</i> Research of the Primary Electric Energy Storage System of a Traction Photovoltaic Module	3	23
<i>M. M. BILIAIEV, V. V. BILIAIEVA, O. V. BERLOV, V. A. KOZACHYNA, P. B. MASHYKHINA</i> Quick computing CFD model to predict chemical pollution in room	4	5
<i>V. V. BILIAIEVA, S. A. SHCHERBYNA</i> Mathematical Modeling of Temperature Fields in Cultivation Structures	4	13
<i>V. Y. ULYANOV, V. V. BILYK</i> On the Issue of the Radon Activity of Tectonic Faults on the Qatar Peninsula	4	21

Article title	Journal number	Page
Electric Transport, Power Systems and Complexes		
<i>O. O. HOLOTA, A. M. MUKHA, D. V. USTYMENKO, S. V. PLAKSIN</i> Investigation of Processes in the Traction Capacitor Circuit of the Model of High-Speed Magnetolevitation Transport	1	30
<i>V. M. KOVALOV, Yu. V. KOVALOVA</i> Increasing the Energy Efficiency of Traction Electric Drives of Direct Current	1	42
<i>E. K. MANAFOV, F. H. HUSEYNOV</i> Modeling of an Integrated Traction Motor Protection System	1	51
Railroad and Roadway Network		
<i>M. B. KURHAN, O. F. LUZHITSKYI, R. V. IVANOV, N. P. KHMELEVSKA, V. S. KHMELEVSKYI</i> Implementation of Innovative Technologies During The Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed Train Traffic	1	62
<i>M. B. KURHAN, A. M. KYPFAH, O. F. LUZHITSKYI, R. V. IVANOV, N. P. KHMELEVSKA</i> Modernization of Existing Level Crossings in the Areas of Construction of the European Standard Railway Track in Ukraine	4	31
<i>N. P. KHMELEVSKA, M. B. KURHAN, D. M. KURHAN</i> Optimization of Curve Correction in the Plan Using Computer Modeling to Improve Train Safety	4	46
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling		
<i>Y. D. OSTAPETS</i> Experimental Evaluation of The Effectiveness of Using Visual Cues for Controlling Unmanned Vehicles	2	34
<i>O. V. GORBOVA, D. V. BOHUTSKYI</i> Contextual Analysis of the Site	3	32
Material Science		
<i>I. O. VAKULENKO, S. O. PLITCHENKO, K. ASGAROV, B. V. LYTVYNOV, A. ORAK, H. UMUR</i> Influence of the Isothermal Transformation Temperature on the Structure and Properties of Low-Carbon Steel	2	43
Mechanical Engineering		
<i>V. M. BOHOMAZ, V. J. NAGACHEVSKYI, M. V. PRYIMAK</i> Analysis of the Influence of Machine Operation Parameters on the Technical Characteristics of the Elevator in the Point of Cleaning and Washing of the Equipment Park	3	40
<i>O. S. KUROIPIATNYK, O. L. KRASNOSHCHOK</i> Clarification of the Methodology for Determining the Characteristics of Cable Cars	3	51

Article title	Journal number	Page
Rolling Stock and Train Traction		
<i>G. L. VATULIA, A. O. LOVSKA, YE. S. KRASNOKUTSKYI, P. V. RUKAVISHNIKOV</i> Determination of the Strength of a Container with Sandwich Panel Walls under Operational Loading Conditions	1	84
<i>A. Ya. KUZYSHYN, V. V. KOVALCHUK</i> Experimental Study of the Regularities of Deformation of the Rubber Cord Shell of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock	2	53
<i>Ye. S. RIABOV, B. Kh. YERITSIAN, I. M. KOLODII, S. V. IVANOV, O.A. SYCH, A. V. HALYCH</i> Increasing the Fuel Efficiency of a Mainline Diesel Locomotive with Separate Section Loading	2	64
<i>A. Ya. KUZYSHYN, V. V. KOVALCHUK, N. V. KOSTIV</i> Investigation of the Influence of a Turnout Cross on Vertical and Horizontal Deformations of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock	3	63
<i>S. V. PANCHENKO, A. O. LOVSKA, M. V. PAVLIUCHENKOV, P. V. RUKAVISHNIKOV</i> Design Features of a Removable Module for Securing Containers in Gondola Cars	3	73
<i>A. YA. KUZYSHYN, V. V. KOVALCHUK, YU. H. SOBOLEVSKA</i> A Spatial Mathematical Model of the Dynamic Behavior of Modern Rolling Stock in High-Speed Traffic	4	55

Transport Construction

<i>D. O. BANNIKOV, A. V. RADKEVYCH, S. M. KOSIACHEVSKA</i> Changes to the Regulatory Definition of Climatic Loads and Impacts on Building Structures	1	92
<i>D. S. SPIVAK, S. V. KLIUCHNYK</i> Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top	1	105
<i>L. I. KLOCHKO</i> Bearing Steel Structures for Installation of Railway Strain Gauge Scales	2	80
<i>Ye. A. MISIURA</i> Determination of the Efficiency of Steel Structures of a Warehouse Building Roof	2	91
<i>S. O. OLISHEVSKA</i> Overview of Landslide Trends in the World and in Ukraine	2	100
<i>O. V. HROMOVA</i> Selection of Components and Methods of Modification of Soil Cement to Improve the Performance Properties of Subgrade	4	67
<i>H. P. IVANOVA, V. YE. OLISHEVSKA, S. M. HAPIEIEV, S. O. OLISHEVSKA</i> Construction Industry in Ukraine: Transformations and Prospects in the Context of Martial Law and Postwar Reconstruction	4	80

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, В. В. БІЛЯЄВА, О. В. БЕРЛОВ,
В. А. КОЗАЧИНА, П. Б. МАШИХІНА**

Швидка обчислювальна CFD-модель для прогнозування
хімічного забруднення приміщення 5

В. В. БІЛЯЄВА, С. А. ЩЕРБИНА

Математичне моделювання температурних полів
у культивацийних спорудах 13

В. Ю. УЛЬЯНОВ, В. В. БІЛИК

До питання про наявність радонової активності
тектонічних розломів півострова Катар 21

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

**М. Б. КУРГАН, А. М. КУРГАН, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ,
Р. В. ІВАНОВ, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА**

Модернізація наявних переїздів на напрямках
будівництва в Україні залізничної колії європейського
стандарту..... 31

Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН

Оптимізація виправлення кривих у плані за допомогою
комп'ютерного моделювання для підвищення безпеки
руху поїздів 46

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**А. Я. КУЗИШИН, В. В. КОВАЛЬЧУК,
Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА**

Просторова математична модель динамічної поведінки
сучасного рухомого складу в умовах швидкісного
руху..... 55

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

О. В. ГРОМОВА

Підбір складових та способи модифікації ґрунтоцементу
з метою підвищення експлуатаційних властивостей
земляного полотна 67

**Г. П. ІВАНОВА, В. Є. ОЛШЕВСЬКА, С. М. ГАПЄЄВ,
С. О. ОЛШЕВСЬКА**

Будівельна галузь України: трансформації та
перспективи в умовах воєнного стану та повоєнної
відбудови..... 80

**ТЕМАТИЧНИЙ ПОКАЖЧИК ЖУРНАЛУ
«НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ»**

ЗА 2024 РІК 89

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

- M. M. BILIAIEV, V. V. BILIAIEVA, O. V. BERLOV,
V. A. KOZACHYNA, P. B. MASHYKHINA**
Quick computing CFD model to predict chemical pollution
in room 5
- V. V. BILIAIEVA, S. A. SHCHERBYNA**
Mathematical Modeling of Temperature Fields
in Cultivation Structures..... 13
- V. Y. ULYANOV, V. V. BILYK**
On the Issue of the Radon Activity of Tectonic Faults
on the Qatar Peninsula..... 21

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

- M. B. KURHAN, A. M. KYPIAH, O. F. LUZHYTSKYI,
R. V. IVANOV, N. P. KHMELEVSKA**
Modernization of Existing Level Crossings in the Areas
of Construction of the European Standard Railway Track
in Ukraine..... 31
- N. P. KHMELEVSKA, M. B. KURHAN, D. M. KURHAN**
Optimization of Curve Correction in the Plan Using
Computer Modeling to Improve Train Safety 46

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

- A. YA. KUZYSHYN, V. V. KOVALCHUK,
YU. H. SOBOLEVSKA**
A Spatial Mathematical Model of the Dynamic Behavior
of Modern Rolling Stock in High-Speed Traffic 55

TRANSPORT CONSTRUCTION

- O. V. HROMOVA**
Selection of Components and Methods of Modification
of Soil Cement to Improve the Performance Properties
of Subgrade 67
- H. P. IVANOVA, V. YE. OLISHEVSKA,
S. M. HAPIEIEV, S. O. OLISHEVSKA**
Construction Industry in Ukraine: Transformations and
Prospects in the Context of Martial Law and Postwar
Reconstruction..... 80
- SUBJECT INDEX TO THE JOURNAL «NAUKA TA
PROGRES TRANSPORTU = SCIENCE AND
TRANSPORT PROGRESS» FOR 2024..... 93**

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтю та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 4 (108) 2024

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 11,63. Тираж 100 пр. Зам. №02/04

Український державний університет науки і технологій

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 4 (108) 2024

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 11,63. Circulation 100. Order no. 02/04

Ukrainian State University of Science and Technologies

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r.267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

