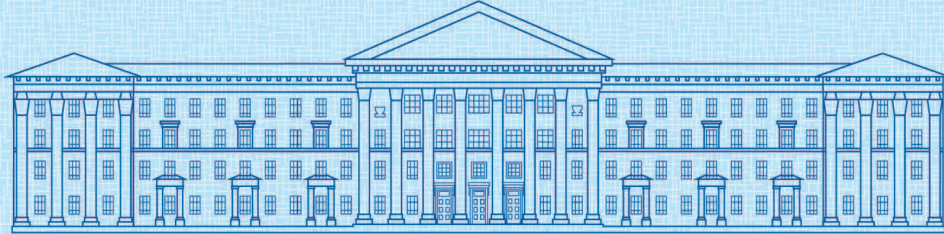




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 6(90)

•• 2020 ••

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

**ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

Науковий журнал

№ 6 (90) 2020

Виходить 6 разів 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

2020

Засновник:
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук
Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляев М. М., ДНУЗТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (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); Мацюк В. І., Державний університет інфраструктури та технологій (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано 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 14.12.2020 р., протокол № 5

Видавець Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро) Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.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);
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipro National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 6 (90) 2020

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ 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

2020

Founder:

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	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., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Masiuk V. I., State University of Infrastructure and Technology (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Śładkowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

Journal was registered	by the 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 14.12.2020, Protocol no. 5
Publisher	Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.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),
- since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 504.5:[628.3:519.87]

M. M. BILIAIEV^{1*}, M. V. LEMESH², O. Y. GUNKO³, V. O. ZADOIA⁴,
P. B. MASHYKHINA⁵, Z. M. YAKUBOVSKA⁶

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

³Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

⁴Dep. «Economics and Management», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 469 60 09, e-mail v.a.zadoia@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978

⁵Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁶Dep. «Power Engineering», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

3D MODELING OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT IN AERATION TANK

Purpose. The main purpose of the article is to develop a 3D CFD model for modeling the process of biological wastewater treatment in an aeration tank. **Methodology.** For mathematical modeling of the process of biological wastewater treatment in the reactor, taking into account the flow hydrodynamics, geometric shape of the aeration tank, convective-diffusion transfer of the substrate and activated sludge, a 3D CFD model was built. The model is based on the three-dimensional equation of motion of an ideal liquid and the equation of mass conservation for the substrate, activated sludge. The field of sewage flow rate in the aeration tank is calculated based on the velocity potential equation. The process of biological transformation of the substrate is calculated on the basis of the Monod model. The splitting scheme was used for numerical integration of the equations of convective-diffusion transfer of activated sludge and substrate. The splitting is carried out in such a way to take into account the transfer of substrate (activated sludge) in only one direction at each step of splitting. The calculation of the unknown value of the substrate (activated sludge) concentration is carried out according to an explicit scheme. The Richardson method is used to numerically integrate the three-dimensional equation for the velocity potential, and the unknown value of the velocity potential is calculated by an explicit formula. Euler's method is used for numerical integration of equations describing the process of substrate transformation and change in activated sludge concentration (Monod model). **Findings.** The software implementation of the constructed 3D CFD model is carried out. A description of the structure of the developed software package is provided. The results of a computer experiment to study the process of wastewater treatment in an aeration tank with additional elements are presented. **Originality.** A new multifactor 3D CFD model has been developed, which allows quick assessing the efficiency of biological treatment in an aeration tank. **Practical value.** The constructed 3D CFD model can be used to analyze the efficiency of the aeration tank under different operating conditions at the stage of sketch design of wastewater treatment systems.

Keywords: water treatment; biological water treatment; mathematical modeling; aeration tank; Monod model

Introduction

To determine the efficiency of biological wastewater treatment at the design stage of aeration tanks, it is necessary to use special mathematical models [3, 4, 6]. Nowadays, balance, empirical and analytical models are most often used to solve this problem [1–5, 7–17]. But in some cases, these models cannot provide a reliable result, because they do not take into account primarily the geometric shape of the reactor and the process of hydrodynamics, as well as a number of other parameters. In this regard, the problem of the development of mathematical models that allow theoretical investigation of the process of biological wastewater treatment in aeration tanks, taking into account the most important factors is relevant [1, 2, 6–10].

Purpose

The work is aimed to develop a three-dimensional CFD-model of the process of biological wastewater treatment in aeration tanks. The model must perform real-time calculation. In addition, the model should be acceptable for implementation on low- and medium-power computers.

Methodology

To model the biological wastewater treatment in the aeration tank the following equations are used:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial uX}{\partial x} + \frac{\partial vX}{\partial y} + \frac{\partial wX}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial X}{\partial z} \right); \quad (2)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X; \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X, \quad (4)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s},$$

where K_d – extinction coefficient of activated sludge; t – time; $X(x, y, z, t)$ – concentration of activated sludge in the bioreactor; $S(x, y, z, t)$ – substrate concentration in the bioreactor; $\mu_{x,y,z}(t)$ – empirical parameter; μ_{\max} – parameter in the Mono model; Y – empirical parameter; K_s – parameter in the Mono model; $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ – components of the water flow rate in the bioreactor, in the direction of the axes x, y, z , respectively; μ_x, μ_y, μ_z – diffusion coefficients, respectively, in the direction x, y, z ; t – time.

Let us note that the diffusion coefficients μ_x, μ_y, μ_z are different values, but in the scientific literature there is a significant shortage of data on their values. Therefore, in practice, the calculations are carried out under the condition $\mu_x = \mu_y = \mu_z$. Determining these parameters experimentally is a rather difficult task.

For practical use of equations of model (1) – (4) it is necessary to calculate the non-uniform flow velocity field in the reactor, i.e. to determine the parameters $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$, under the action of these parameters there is a convective transfer of substrate and activated sludge in the bioreactor. To calculate the non-uniform flow velocity field in the bioreactor, we use the 3D equation for the velocity potential:

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

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

The boundary conditions for modeling equations are as follows:

– on the surfaces of the building, solid walls,
upper surface: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial X}{\partial n} = 0$, where
 n – outward normal to a surface;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– at the entrance boundary:
 $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, $S = S_{in}$, $X = X_{in}$, where V_n – flow velocity; S_{in} , X_{in} – known concentration;

– at the boundary of outflow of the building:
 $P = P_0 + const$, $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial X}{\partial n} = 0$.

CFD model. The method of solving the mass transfer equations from system (1) – (2) will be considered using the example only for the substrate transfer equation. The equation for the transfer of activated sludge has a similar form. The three-dimensional equation for the substrate transfer from the system (1) is split into a system of one-dimensional equations as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Equations from system (7) describe the process of substrate transfer in the directions of the x , y , z axes.

The difference equations that make it possible to solve the system of equations (7) are as follows:

– step 1 for the first equation:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j,k}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j,k}^+ S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j,k}^+ S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ &+ \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^n + S_{i+1,j,k}^n}{\Delta x^2}; \end{aligned} \quad (8)$$

– step 2 for the first equation:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k}^{n+1} &= S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j,k}^- S_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- S_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \\ &+ \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+1} + S_{i+1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

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

– step 1 for the second equation:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j,k}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1,k}^+ S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j,k}^+ S_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \\ &+ \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^n + S_{i+1,j,k}^n}{\Delta y^2}; \end{aligned} \quad (10)$$

– step 2 for the second equation:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k}^{n+1} &= S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1,k}^- S_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- S_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} + \\ &+ \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

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

– step 1 for the third equation:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j,k}^n - \Delta t \frac{w_{i,j,k+1}^+ S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - w_{i,j,k}^+ S_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} + \\ &+ \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} + \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^n + S_{i,j,k+1}^n}{\Delta z^2}; \end{aligned} \quad (12)$$

– step 2 the third equation:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k}^{n+1} &= S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{w_{i,j,k+1}^- S_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- S_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} + \\ &+ \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} + \Delta t \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+1} + S_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta z^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{where } w^- = \frac{w - |w|}{2}; \quad w^+ = \frac{w + |w|}{2}.$$

We solve the equation of activated sludge transfer from system (2) according to a similar finite-difference scheme. After solving the transfer equations for X and S , for each difference cell, we solve equations (3) – (4) using the Euler method. That is, we determine new values of the substrate

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

and activated sludge concentration due to their biological interaction. Difference expressions have the form:

$$S_{i,j,k}^{n+1} = S_{i,j,k}^n - dt \cdot \frac{\mu_{i,j,k}^n}{Y} X_{i,j,k}^n;$$

$$X_{i,j,k}^{n+1} = X_{i,j,k}^n - dt \cdot \mu_{i,j,k}^n X_{i,j,k}^n - K_d X_{i,j,k}^n;$$

$$\mu_{i,j,k}^n = \mu_{\max} \cdot \frac{S_{i,j,k}^n}{S_{i,j,k}^n + K_s}.$$

Next, in a new time step, we repeat the calculation of the change in the concentration of substrate and activated sludge in each difference cell due to their movement, diffusion and biological interaction.

To construct a local one-dimensional scheme for solving equation (5), we perform the following transformations. First, let us present this equation as:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (14)$$

where t – fictitious time.

Then, we split equation (14) as follows:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \quad (17)$$

The calculated dependencies (Richardson's method) for determining the unknown value P based on equation (15) have the form:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2}. \quad (18)$$

The calculated dependencies for determining the unknown value P based on equation (16) have the form:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta y^2}. \quad (19)$$

The calculated dependencies for determining the unknown value of P based on equation (17) have the form:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \quad (20)$$

The calculation according to these dependencies ends when the condition is met:

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon, \quad (21)$$

where ε – small number; n – iteration number.

At the next stage we determine the flow velocities:

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

$$w = \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k}}{\Delta z}.$$

FORTRAN was used to encode the difference equations. The BIO-3K code has been created. To use it, one needs to specify the following input data:

- concentration of the substrate entering the bioreactor and its change over time;
- concentration and consumption of activated sludge entering the bioreactor and its change over time;
- dimensions of the bioreactor, its geometric shape;
- values of Monod model parameters;
- wastewater consumption;
- values of diffusion coefficients.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

BIO-3K code includes the following subroutines:

SLE3 – velocity potential calculation in the bioreactor;

SLE3 – velocity field calculation in the bioreactor;

SLM33 – calculation of the substrate concentration field in the bioreactor and its change over time;

SLM33 – calculation of the concentration field of activated sludge in the bioreactor and its change over time;

SLM33 – calculation of changes in the concentration of substrate and activated sludge in the bioreactor according to the dependencies of the Monod model;

SLEM5 – print of the modeling results.

Result of this code is the concentration fields of the substrate and activated sludge in the bioreactor and the change of these fields over time.

Findings

The following are the results of solving the problem of evaluating the efficiency of a biological reactor for wastewater treatment based on the developed three-dimensional CFD model. The calculations are performed on the basis of the following input data:

$S_{in} = 140$ mg/l – the concentration of the substrate ($BOD_{complete}$) entering the structure;

dimensions of the bioreactor 15mx4mx4m;

$Q_s(t) = 1353$ m³ / day – wastewater consumption;

$\mu_x = \mu_y = 2 \cdot 10^{-4}$ m²/day;

$X_{in} = 200$ mg/l – concentration of activated sludge entering the reactor;

$\mu_{max} = 1.04$;

$K_s = 100$ mg/l ;

$K_d = 0.055$ 1/day – coefficient that takes into account the death of microorganisms;

$Y = 0.55$.

Initial condition: $S_{in} = 140$ mg/l ,

$X_{in} = 200$ mg/l – concentration of substrate and activated sludge in the reactor for the moment of time $t = 0$.

The following scenarios are considered:

– scenario 1: the reactor operates without additional elements inside the building;

– scenario 2: inside the reactor there are two solid plates (calculation area is multiconnected);

– scenario 3: the reactor has three plates, but they have a gap.

Initial condition: $S_{in} = 360$ mg/l ,

$X_{in} = 200$ mg/l . We study the process of substrate destruction in the reactor over time according to the Monod model and taking into account mass transfer.

It should be noted that the calculation of spatial flow in multiconnected domains is one of the most complex problems of hydrodynamics.

Evaluation of the bioreactor performance is determined by the substrate concentration at the reactor outlet. Fig. 1–6 show the distribution of substrate concentration in the bioreactor for all scenarios, where each number indicates the concentration as a percentage of the maximum concentration in the calculation area (the time shown in the figures is dimensionless). The number 99 corresponds to the maximum value of the concentration in percent. These values are printed in the INTEGER format, i.e. only the integer value of the real number is printed. For example, if at some point in the reactor the concentration is 61.95 %, then the number 61 is printed. Since the three-dimensional problem is being solved, the concentration is shown in different sections of the bioreactor, the time is dimensionless.

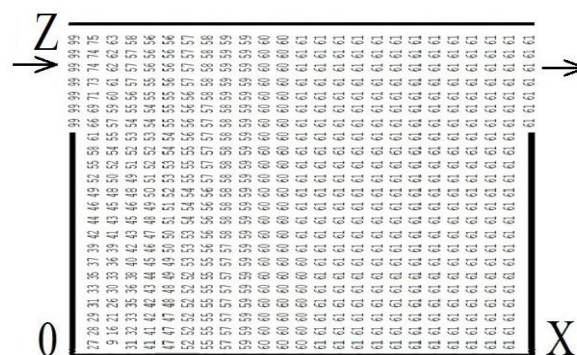


Fig. 1. Distribution of substrate concentration in the bioreactor, cross section $y = 2$ m, $t = 0.24$ (scenario 1)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

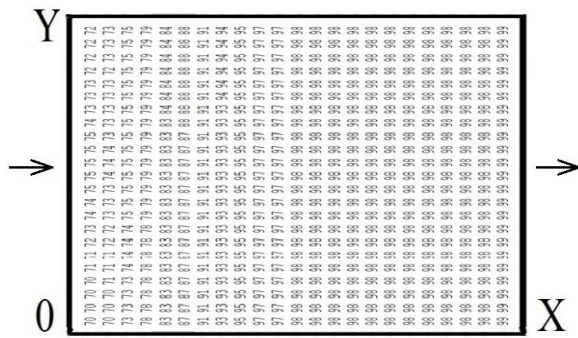


Fig. 2. Distribution of substrate concentration in the bioreactor, cross section $z = 2$ m, $t = 0.24$ (scenario 1)

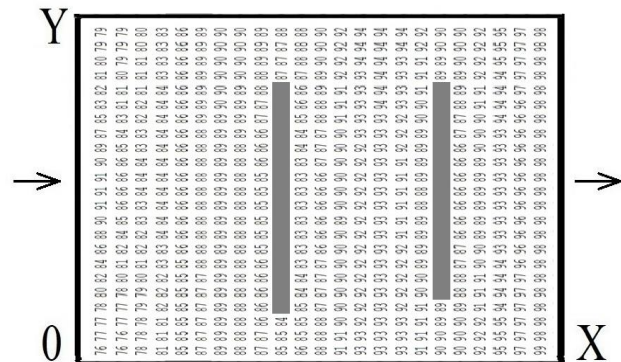


Fig. 5. Distribution of substrate concentration in the bioreactor, cross section $z = 2$ m, $t = 0.40$ (scenario 2)

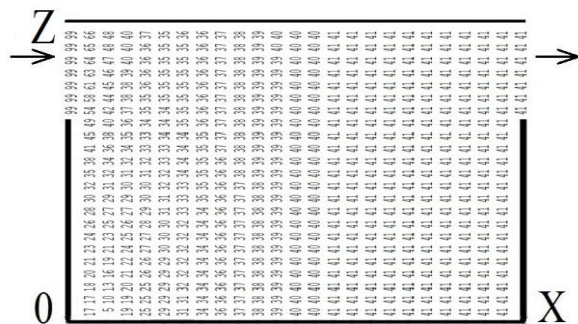


Fig. 3. Distribution of substrate concentration in the bioreactor, cross section $y = 2$ m, $t = 0.40$ (scenario 1)

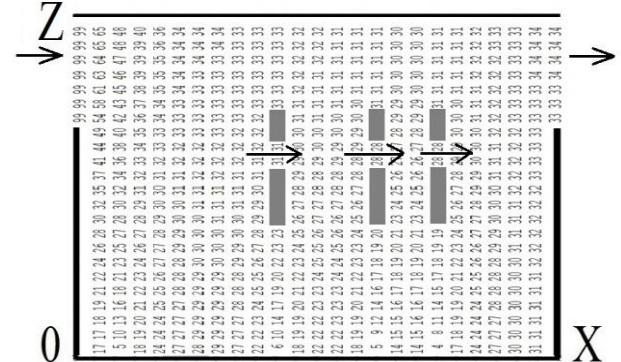


Fig. 6. Distribution of substrate concentration in the bioreactor, cross section $y = 2$ m, $t = 0.40$ (scenario 3)

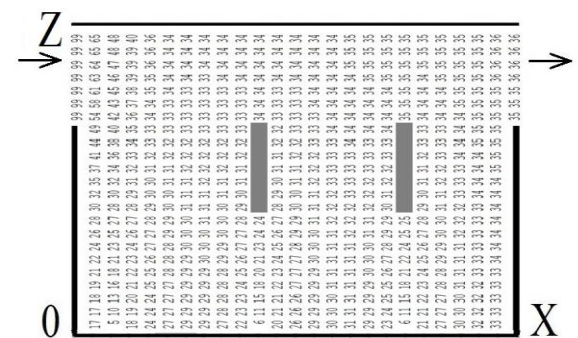


Fig. 4. Distribution of substrate concentration in the bioreactor, cross section $y = 2$ m, $t = 0.40$ (scenario 2)

The figures show that inside the reactor there is a significantly uneven distribution of the substrate concentration, i.e. the process of biological treatment is uneven. The use of plates changes the concentration distribution in the structure, which affects the performance of the reactor.

To analyze the performance of the reactor Table 1 shows the substrate concentration at the outlet for the time $t = 0.40$.

Table 1

Average concentration of substrate at the reactor outlet

Scenario	1	2	3
Concentration	147 mg/l	128 mg/l	118 mg/l

Analysis of data from table 1 shows that the use of plates makes it possible to increase the performance of the biological reactor. That is, we have the opportunity to control the process of wastewater treatment in the bioreactor.

Originality and practical value

A three-dimensional CFD model has been developed to model the process of biological wastewater treatment in an aeration tank. The potential motion model was used to calculate the flow velocity field in the aeration tank. The process of

substrate and activated sludge transfer was determined based on the mass transfer equation. The Monod model was used to calculate the biological treatment process.

The constructed model can be used at the stage of sketch design of structures for wastewater treatment.

Conclusions

The article considers an efficient CFD model that allows you to quickly calculate the process of biological wastewater treatment in the aeration tank, in particular in the presence of additional plates in the middle of the reactor. To solve the problem, the fundamental equations of continuum dynamics are used.

In the future, it is planned to develop a three-dimensional CFD model based on the Navier–Stokes equations.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укреліотек», 2010. 272 с.
4. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. Н., Репин Б. Н. *Очистка производственных стоков в аэротенках*. Москва : Стройиздат, 1973. 223 с.
5. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. *Примеры расчетов канализационных сооружений*. Москва : Высшая школа, 1981. 237 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аэротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10/15407/dopovidi2015.05.055>
7. Alharbi A. O. M. The biological treatment of wastewater : mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94. Iss. 2. P. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>
8. Amaral A., Gillot S., Garrido-Baserba M., Filali A., Karpinska A. M., Plósz B. G., ... Rosso D. Modelling gasliquid mass transfer in wastewater treatment : when current knowledge needs to encounter engineering practice and viceversa. *Water Science & Technology*. 2019. Vol. 80. Iss. 4. P. 607–619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253>
9. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>
10. Bomba A., Klymiuk Y., Prysiazhniuk I., Prysiazhniuk O., Safonyk A. Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1773. P. 040003-1–040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966>
11. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81. Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>
12. Gao H., Stenstrom M. K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades : A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92. Iss. 6. P. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>
13. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks : Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Iss. 5. P. 04020028-1–04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

14. Gao H., Stenstrom M. K. Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. P. 212–224.
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021>
15. Griborio A. *Secondary Clarifier Modeling : A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans : USA, 2004. 440 p.
16. Mocanu C. R., Mihaillescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*. 2012. Vol. 74. Iss. 2. P. 191–198.
17. Pereda M., Zamarrero J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. P. 1128–1133.
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, М. В. ЛЕМЕШ², О. Ю. ГУНЬКО³, В. О. ЗАДОЯ⁴, П. Б. МАШИХІНА⁵,
З. М. ЯКУБОВСЬКА⁶

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

³Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

⁴Каф. «Економіка та менеджмент», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 469 60 09, ел. пошта v.a.zadoya@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978

⁵Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁶Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

3D-МОДЕЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД В АЕРОТЕНКУ

Мета. Основною метою статті є розробка тривимірної CFD-моделі для моделювання процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку. **Методика.** Для математичного моделювання процесу біологічного очищення стічних вод у реакторі, з урахуванням гідродинаміки потоку, геометричної форми аеротенка, конвективно-дифузійного переносу субстрату та активного мулу, побудовано тривимірну CFD-модель. В основу моделі покладено тривимірне рівняння руху ідеальної рідини та рівняння збереження маси для субстрату й активного мулу. Поле швидкості потоку стічних вод в аеротенку розраховано на базі рівняння для потенціалу швидкості. Процес біологічного перетворення субстрату розраховано на базі моделі Monod. Для чисельного інтегрування рівнянь конвективно-дифузійного переносу активного мулу та субстрату використано схему розщеплення. Розщеплення здійснено так, щоб на кожному кроці враховувався перенос субстрату (активного мулу) лише в одному напрямку. Розрахунок невідомої величини концентрації субстрату (активного мулу) виконано за явною схемою. Під час чисельного інтегрування тривимірних рівнянь для потенціалу швидкості використано метод Річардсона, розрахунок невідомого значення потенціалу швидкості здійснено за явною формулою. Для чисельного інтегрування рівнянь, що описують процес трансформації субстрату та зміну концентрації активного мулу (модель Monod), використано метод Ейлера. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію побудованої тривимірної CFD-моделі. Описано структуру розробленого пакету програм. Подано результати проведеного комп'ютерного експерименту з дослідження процесу очищення стічних вод в аеротенку з додатковими елементами. **Наукова новизна.** Розроблено нову багатofакторну тривимірну CFD-модель, що дозволяє швидко оцінити ефективність біологічного очищення стічних вод в аеротенку. **Практична значимість.** Побудована CFD-модель може бути використана для ана-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

лізу ефективності роботи аеротенку за різних умов експлуатації та на етапі ескізного проектування систем очищення стічних вод.

Ключові слова: очищення води; біологічне очищення води; математичне моделювання; аеротенк; модель Monod

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, М. В. ЛЕМЕШ², Е. Ю. ГУНЬКО³, В. А. ЗАДОЯ⁴, П. Б. МАШИХИНА⁵,
З. Н. ЯКУБОВСКАЯ⁶

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

³Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

⁴Каф. «Экономика и менеджмент», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (096) 469 60 09, эл. почта v.a.zadoya@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978

⁵Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁶Каф. «Энергетика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКЕ

Цель. Основной целью статьи является разработка трёхмерной CFD-модели для моделирования процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке. **Методика.** Для математического моделирования процесса биологической очистки сточных вод в реакторе, с учетом гидродинамики потока, геометрической формы аэротенка, конвективно-диффузионного переноса субстрата и активного ила, построена трёхмерная CFD-модель. В основу модели положено трехмерное уравнение движения идеальной жидкости и уравнение сохранения массы для субстрата и активного ила. Поле скорости потока сточных вод в аэротенке рассчитано на базе уравнения для потенциала скорости. Процесс биологического превращения субстрата рассчитано на базе модели Monod. Для численного интегрирования уравнений конвективно-диффузионного переноса активного ила и субстрата использована схема расщепления. Расщепление осуществлено так, чтобы на каждом шагу учитывался перенос субстрата (активного ила) только в одном направлении. Расчет неизвестной величины концентрации субстрата (активного ила) осуществлен по явной схеме. Для численного интегрирования трехмерного уравнения для потенциала скорости использован метод Рундсона, расчет неизвестного значения потенциала скорости осуществлен по явной формуле. Для численного интегрирования уравнений, описывающих процесс трансформации субстрата и изменение концентрации активного ила (модель Monod), использован метод Эйлера. **Результаты.** Осуществлена программная реализация построенной трёхмерной CFD -модели. Описана структура разработанного пакета программ. Представлены результаты проведенного компьютерного эксперимента по исследованию процесса очистки сточных вод в аэротенке с дополнительными элементами. **Научная новизна.** Разработана новая многофакторная трёхмерная CFD-модель, позволяющая быстро оценить эффективность биологической очистки сточных вод в аэротенке. **Практическая значимость.** Построенная CFD-модель может быть использована для анализа эффективности работы аэротенка при различных условиях эксплуатации и на этапе эскизного проектирования систем очистки сточных вод.

Ключевые слова: очистка воды; биологическая очистка воды; математическое моделирование; аэротенк; модель Monod

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya: monografiya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
3. Vasilenko, O. A., Grabovskiy, P. O., Larkina, G. M., Polishchuk, O. V., & Progulny, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiya i intensyfikatsiya sporud vodopostachannya ta vodovidvedennya: navchalnyy posibnyk*. Kyiv: IVNVKP «Ukrgeiotek». (in Ukrainian)
4. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykhstochnykh vod v aerotenkakh*. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
5. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalitsun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
6. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347-348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411> (in English)
8. Amaral, A., Gillot, S., Garrido-Baserba, M., Filali, A., Karpinska, A. M., Plósz, B. G., ... Rosso, D. (2019). Modelling gas–liquid mass transfer in wastewater treatment: when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice versa. *Water Science and Technology*, 80(4), 607-619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253> (in English)
9. Babaei, A. A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and kinetic evaluation of upflow anaerobic biofilm reactor for nitrogen removal from wastewater by Anammox process. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
10. Bomba, A., Klymiuk, Y., Prysiashniuk, I., Prysiashniuk, O., & Safonyk, A. (2016). Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*, 1773, 040003-1-040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966> (in English)
11. Dapelo, D., & Bridgeman, J. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)
12. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2019). Development and applications in computational fluid dynamics modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)
13. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(5), 04020028-1-04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689) (in English)
14. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 212-224. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021> (in English)
15. Griborio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans: USA. (in English)
16. Mocanu, C. R., & Mihaillescu, R. (2012). Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*, 74(2), 191-198. (in English)
17. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011). Agent–based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterrian Conference on Control and Automation Aquis* (pp. 1128-1133). DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)

Received: August 11, 2020

Accepted: December 11, 2020

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 339.97:656.073.235(476)(510)

О. А. ХОДОСКИНА^{1*}, А. А. ИГРАЕВА², В. Е. НАУМОВА³

^{1*}Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, эл. почта hodoskinaolga@gmail.com, ORCID 0000-0003-2254-9638

²Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +375 (44) 711 81 02, эл. почта aigraeva@gmail.com, ORCID 0000-0002-4973-115X

³Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +375 (44) 584 47 36, эл. почта naumovavi18@gmail.com, ORCID 0000-0002-4587-8680

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕЛОРУССКО-КИТАЙСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА «ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОЯС ШЕЛКОВОГО ПУТИ»

Цель. Наиболее грандиозным экономическим и геополитическим проектом в настоящее время является инициатива «Новый шелковый путь», которая может радикальным образом модифицировать транспортные и денежные потоки в Евразии и во всем мире. Она включает проекты «Экономический пояс Шёлкового пути» и «Морской шёлковый путь XXI века» и предполагает создание обширной инфраструктурной сети по пути от западных границ Китая через страны Центральной Азии и Иран в Европу. Поэтому целью данной работы является подробное разностороннее изучение и анализ развития белорусско-китайского сотрудничества по проекту «Экономический пояс Шелкового пути», а также определение дальнейших его перспектив. **Методика.** В процессе исследования использован статистический, территориально-отраслевой и ретроспективный анализ функционирования экономических систем. **Результаты.** Республика Беларусь стала важнейшим звеном в создании «Экономического пояса Шелкового пути». Она обладает уникальным географическим преимуществом и чрезвычайно удобными экономическими и культурными условиями, будучи ключевой страной в Восточной Европе, находясь на стыке Европейского Союза и Евразийского экономического союза, привлекает развитой транспортной инфраструктурой, высоким уровнем образования и профессиональными ресурсами. Проект «Новый шелковый путь» ориентирован в первую очередь на железнодорожное сообщение. Основным потенциалом для Республики Беларусь в транзитных перевозках – использование контейнеров (фактически единственного способа транспортировки товаров в евразийском транзите). **Научная новизна.** На данной стадии развития проекта построение полномасштабной функциональной и эффективной модели для прогнозирования результатов реализации конкретного подпроекта невозможно. Однако на современном этапе научную новизну представляет так называемая «постановка задачи» на основе полученных аналитических данных. Они позволяют определить существующие проблемы при реализации проекта, сформулировать возможные решения и использовать их при проведении экономического анализа эффективности других международных проектов аналогичного типа (решения аналогичных экономических задач). **Практическая значимость.** Рассмотрены перспективы и сложности развития перевозок ускоренными контейнерными поездами товаров и грузов из Китайской Народной Республики (КНР) в Республику Беларусь. Для преодоления дисбаланса во внешней торговле с Китаем предложены меры по решению этой проблемы, уделено внимание проекту строительства высокоскоростной магистрали (ВСМ) «Евразия», которая должна соединить Китай с Западной Европой через Россию и Беларусь.

Ключевые слова: Белорусская железная дорога (БЖД); Новый шелковый путь; ускоренные контейнерные поезда; Китай; «БЕЛИНТЕРТРАНС – транспортно-логистический центр»; экспортируемые товары; импорт

Введение

Сегодня международное сотрудничество имеет огромное значение для всех отраслей государств – от уже привычной международной торговли до координации международных проектов и разработок в области интеллектуальных технологий, медицины. Однако с позиции экономического развития международное сотрудничество неотъемлемо связано с транспортом, торговлей и логистикой. Среди государств-членов Евразийского экономического союза Республика Беларусь занимает особенное место, что связано прежде всего с ее выгодным географическим положением. Исторически сложилось так, что страна находится на пересечении основных торговых путей, а значит – и в центре торгово-экономических отношений и интересов стран Востока и Западной Европы (в частности, стран ЕС).

Несмотря на отсутствие выхода к морю, что автоматически причисляет Беларусь к числу европейских государств без доступа к ключевым торговым портам, республика расположена на пересечении важнейших транспортных коридоров, что обуславливает ее роль в региональной и международной торговле.

В условиях снижения экономического роста мировой экономики для Республики Беларусь важно отыскать новые формы сотрудничества и сформировать соответствующие механизмы экономического развития. Одним из таких перспективных направлений сотрудничества в настоящее время являются активно развивающиеся отношения Республики Беларусь с Китайской Народной Республикой. Представители китайского делового сообщества неоднократно подчеркивали, что они рассматривают Беларусь как важную составляющую проекта строительства Нового шелкового пути – глобального экономического проекта, имеющего «ответвления» в области торговли, транспорта, логистики и социальных отношений.

Цель

Великий шёлковый путь с древности известен как один из глобальных торговых путей, соединявших Восток и Запад, и считался крайне востребованным, но ввиду различных историко-

экономических обстоятельств со временем утратил свою значимость. В 2013 г. председатель КНР Си Цзиньпин выступил с инициативой возродить этот проект на основе концепции «Один пояс, один путь». Республика Беларусь является активным участником данного международного проекта. Поэтому целью настоящей работы является подробное разностороннее изучение и анализ развития белорусско-китайского сотрудничества по проекту «Экономический пояс Шелкового пути», определение дальнейших его перспектив, а также выявление на основе аналитических данных существующих проблем (как уникальных для данного проекта, так и общих, варианты решения которых могут быть актуальны и для других аналогичных проектов).

Методика

Для определения уровня развития белорусско-китайских отношений по различным направлениям экономико-социальной деятельности, входящим в область действия проекта, использован статистический, территориально-отраслевой и ретроспективный анализ функционирования экономических систем. Применение ретроспективного анализа позволяет на основании полученных аналитических данных смоделировать поведение субъектов рассматриваемой экономической системы (в данном случае – участников проекта «Один пояс, один путь») и дальнейшие перспективы их развития, минимизировав при этом требуемые затраты всех видов ресурсов.

Результаты

Новый шелковый путь ориентирован на формирование торгово-экономического и транспортного коридора, связывающего более 60 стран Центральной Азии, Европы и Африки. Путь включает два направления реализации: сухопутное – «Экономический пояс Шёлкового пути (ЭПШП)» и водное – «Морской шёлковый путь XXI века». «Экономический пояс Шёлкового пути (ЭПШП)» ведет в Европу по суше через Центральную и Юго-Западную Азию. «Морской шелковый путь XXI века» проходит через Южно-Китайское море и Индийский океан, свя-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

зывая Пекин с Лиссабоном [8–11]. Миссия китайской стратегической инициативы – сблизить Азию и Европу.

Новый шелковый путь (НШП) предполагает разработку и строительство большого количества инфраструктурных объектов: железные дороги, автотрассы, электростанции и промышленные парки. Назначение данного международного проекта состоит не только в том, чтобы выстроить самые удобные и быстрые транзитные маршруты через центр Евразии, но и в том, чтобы преодолеть несбалансированность в экономическом развитии внутренних регионов Китая (западных и северо-восточных провинций) и соседних стран, а также определить новые рынки сбыта для китайских товаров.

Республика Беларусь является важным транспортным узлом в Европе для «Экономического пояса Шелкового пути», находясь между Востоком и Западом. В конце 2014 года Министерство экономики РБ подписало с Министерством коммерции КНР протокол о сотрудничестве. Таким образом, было положено начало взаимовыгодному партнерству Республики Беларусь и Китая в рамках стратегии «Экономический пояс Шелкового пути». 29 сентября 2016 года между правительствами Беларуси и Китая в присутствии глав обоих государств во время официального визита 28–30 сентября Президента Александра Лукашенко в Китай состоялось подписание «Комплекса мер по совместному продвижению строительства концепции «Один пояс, один путь», что способствовало выведению белорусско-китайских отношений на новый уровень. Впоследствии 16 мая 2017 года в Пекине в ходе мероприятий международного форума «Один пояс, один путь» было заключено соглашение между Правительством Республики Беларусь и Правительством Китайской Народной Республики о развитии международных грузовых перевозок и сотрудничестве в реализации концепции строительства «Экономического пояса Шелкового пути». Данный документ способствует совершенствованию совместной деятельности в области организации перевозок грузов и улучшению качества работы логистических центров, находящихся на территории обеих стран.

Перевозки в рамках Нового шёлкового пути осуществляются в основном в 20- и 40-футовых

контейнерах. Использование контейнеров при массовых перевозках грузов имеет ряд преимуществ, таких как обеспечение сохранности груза, стандартные размеры, экономия времени на выполнение погрузочно-разгрузочных работ, унифицированность транспортной документации и оптимизация составления логистических схем.

Развитие перевозок контейнерными поездами в сообщении с Китаем является для БЖД стратегическим и многообещающим направлением. Субсидирование со стороны китайских властей экспортных железнодорожных перевозок является основой белорусско-китайских внешнеэкономических отношений. Перевозки с Китая выполняют по двум ведущим направлениям: транзитные перевозки ускоренными контейнерными поездами по БЖД, а также экспортно-импортные перевозки промышленными предприятиями Беларуси на основании подписанных внешнеэкономических контрактов [1, 3–5, 7].

Спрос на железнодорожные перевозки из Китая в Беларусь не снижается на протяжении многих лет. Наибольшее внимание доставке грузов по железной дороге начали уделять с апреля 2016 года в связи с началом курсирования ускоренных китайских поездов. Перевозки грузов в контейнерах занимают первое место по популярности среди прочих способов транспортировки по железной дороге.

Ускоренный контейнерный поезд – это исключительные сроки и условия доставки товаров и грузов из КНР в Республику Беларусь. Он гарантирует наиболее приемлемое соотношение цены и сроков перевозки. Это отличный вариант для китайских компаний, которым нужно быстро и качественно перевезти оборудование, материалы и другие грузы для определенного проекта. Например, в данный момент это актуально в рамках устройства промышленного парка «Великий Камень». Также для железнодорожных перевозок характерна надежность, что является важным преимуществом. Ускоренные контейнерные поезда идут без реформирования и с минимумом остановок в пути следования, тем самым обеспечивая скорость доставки товара покупателю.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

В 2017 году образовался сервис ускоренных поездов Китай – Европа – Китай, который благополучно реализуется в течение последних лет. В январе того же года стартовал ускоренный китайский поезд по новому маршруту Чаньша (Китай) – Колядичи (Беларусь). Уникальность этого поезда состояла в том, что он делал остановку и выгрузку грузов в Минске. Главное преимущество данного поезда заключалось в сроках доставки – всего 16 дней, вследствие того, что поезд шел без остановок из Китая до Колядичей.

С 2018 года ускоренные контейнерные поезда из Беларуси направлялись в три города Китая: Чунцин, Сиань и Чжэнчжоу, а 2 апреля 2019 года в рамках развития железнодорожных грузовых перевозок Китай – Европа был запущен маршрут, соединяющий портовый город Циндао в провинции Шаньдун на востоке Китая и столицу Беларуси Минск и включающий 90 стандартных контейнеров с деталями для двигателей, солнечными модулями и другими товарами. Новый маршрут стал частью сети мультимодальных перевозок с города Циндао. К настоящему времени с этого города открыты маршруты смешанных перевозок, связывающие Китай с Центральной Азией, Монголией и Европой.

Основная часть контейнерного транзита по белорусской территории проходит по маршруту Осиновка – Орша – Брест. Здесь находится крупнейший перегрузочный участок. Основное инфраструктурное ограничение для перспективного роста трансъевразийского транзита – недостаточные пропускные и перерабатывающие мощности польских железных дорог, включая пункты пропуска на белорусско-польской границе. Наиболее интенсивный трафик контейнерных поездов характерен для погранперехода Брест (Беларусь) – Малашевиче (Польша). Через него проходят практически все маршруты, связывающие Китай и ЕС. С учетом текущего состояния инфраструктуры, локомотивного и вагонного парков в Польше существенный рост контейнеропотока через переход Брест – Малашевиче видится чрезвычайно проблемным.

В качестве решения проблемы для избежания простоев транспортных средств на участке Брест – Малашевиче следует использовать другие белорусско-польские погранпереходы. Как

альтернативный вариант рассматривают перевозки через пограничные переходы Брузги – Кузница, Брест – Тересполь, Свислочь – Семяновка.

За три месяца 2020 года общее количество перевозимых в контейнерах грузов по БЖД составило свыше 174 тыс. контейнеров в ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент), что на 13 % больше, чем за аналогичный период 2019 г. При этом экспортные перевозки из Беларуси увеличились на 21 % и превзошли показатель в 25,6 тыс. контейнеров в ДФЭ, ввоз в страну прибавил 19,7 %, транзит – 5,4 %, внутриреспубликанские перевозки возросли более чем в три раза.

Для обеспечения конкурентного преимущества перевозок грузов по магистрали и развития бизнеса контейнерных перевозок БЖД проводит согласованную тарифную политику с железнодорожными компаниями России, Казахстана, Китая и стран Западной Европы. Кроме того, БЖД приняла решение о снижении до 40 % тарифных условий на перевозки порожних контейнеров, идущих транзитом по территории Беларуси из стран Западной Европы в Китай, с целью равновесия грузопотоков в сообщении Восток – Запад и Запад – Восток.

В рамках глобального инфраструктурного проекта «Один пояс, один путь» летом 2017 года руководство ОАО «Российские железные дороги» представило проект высокоскоростной магистрали (ВСМ) «Евразия», которая должна пройти из Китая в Европу по территории шести государств: Германии, Польши, Беларуси, России, Казахстана и Китая. Протяженность ВСМ составит 9,5 тыс. км, а общая стоимость строительства – 118 млрд долларов. Ожидается, что средняя скорость поездов на магистрали составит 250 км/ч, следовательно, срок доставки грузов из Китая в Европу будет занимать менее двух суток, а на данный момент морским путем он составляет 12–14 дней.

Рациональность осуществления проекта обусловлена возрастающим объемом торговли товарами с высокой добавочной стоимостью, а также чувствительных к сроку доставки. Более того, расширяется объем электронной торговли, прежде всего между Китаем и Европой.

Республиканское транспортно-экспедиционное унитарное предприятие

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

«БЕЛИНТЕРТРАНС – транспортно-логістический центр» (БТЛЦ) Белорусской железной дороги рассматривает международный проект «Один пояс, один путь» как одну из важнейших задач своего развития. В настоящее время предприятие сотрудничает с 15 китайскими провинциями и обеспечивает доставку белорусской продукции в любую точку Китая, включая услугу «последней мили». За последние 8 месяцев 2020 года предприятие в 3,5 раза увеличило к аналогичному периоду прошлого года объемы перевозок белорусской экспортной продукции по железной дороге в Китай. Всего за этот промежуток времени перевезено 2,5 тыс. контейнеров ДФЭ. Организована отправка в Китай 27 полносоставных контейнерных поездов с белорусской продукцией лесной и пищевой промышленности. Сотрудники организации разработали логистические схемы и маршруты доставки грузов контейнерными поездами в сообщении Китай – Европа – Китай, а также Китай – Беларусь – Китай. В частности, 23 марта 2020 г. в рамках инициативы «Один пояс, один путь» состоялась отправка первого экспортного контейнерного поезда со ст. Колядичи в г. Чэнду (Китайская Народная Республика) с грузом «целлюлоза беленая» (продукция ОАО «Светлогорский ЦКК»).

В Китай отправляют поезда с различной номенклатурой грузов (калийные удобрения, молоко и молочная продукция, полиамиды, целлюлоза, лен-сырец или лен обработанный). Но в целом для товарной структуры экспортного грузопотока из стран ЕАЭС в Китай присуща низкая доля контейнерных грузов: всего около 1,5–2 %. Это обусловлено значительной долей «неконтейнеризируемых» грузов (топливо, минеральное сырье, лесоматериалы и т. д.).

Основные импортируемые китайские товары – аппаратура связи и запчасти к ней, вычислительные машины, кузова и запчасти для автомобилей и тракторов, чулочно-носочные изделия, ткани из синтетических комплексных нитей.

В настоящий момент наблюдается дисбаланс во внешней торговле, так как импорт товаров из Китая существенно превышает экспорт. Основная задача состоит в снижении сырьевой составляющей в структуре отечественного экспорта. Главным успехом в этой связи стало завершение

аккредитации белорусских производителей мясной и молочной продукции в КНР. Открытие китайского рынка для белорусского молока, говядины, мяса птицы вызвало большую заинтересованность у покупателей. Ощутимо увеличилась конкуренция за белорусские высококачественные продукты питания. По итогам 2018 года, поставки молока на китайский рынок выросли в 6 раз, а общий экспорт пищевой продукции увеличился в 5 раз [2, 6].

Научная новизна и практическая значимость

Необходимо отметить, что описать с научной точки зрения взаимоотношения предприятий и государств в рамках реализации международного сотрудничества «Один пояс, один путь» достаточно непросто, так как это не относится к стандартным функциональным зависимостям. Научную же значимость на современном этапе представляет в первую очередь так называемая «постановка задачи» на основе аналитических данных, полученных в ходе проведенного исследования, которые позволяют не только определить существующие проблемы при реализации рассмотренного проекта, но также использовать их при проведении экономического анализа эффективности других международных проектов аналогичного типа (решения аналогичных экономических задач).

По мнению авторов, в перспективе данный проект может быть описан уникальной экономико-математической моделью, базирующейся на параллельно-последовательном экономико-математическом описании подмоделей, входящих в общую модель проекта. Однако учитывая, что этот проект рассчитан на долгосрочное сотрудничество и на данный момент находится практически в первоначальной стадии, включающей организацию соответствующей инфраструктуры, налаживание международных связей, определение направлений и глубины логистического взаимодействия участников, построение полномасштабной функциональной и эффективной модели, которая позволила бы с требуемой точностью спрогнозировать результаты реализации конкретного подпроекта, на этом этапе невозможно. С практической же сто-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

роны подробное рассмотрение результатов развития белорусско-китайского сотрудничества «Экономический пояс Шелкового пути» позволяет создать базу для наиболее эффективного перспективного сотрудничества.

Выводы

Подводя итоги, можно сказать, что сейчас создаются все условия для наращивания объема грузоперевозок между Китаем и Беларусью вследствие субсидий со стороны китайских властей. В настоящее время Республика Беларусь

все еще в разы меньше экспортирует свои товары, чем импортирует товары из Китая. Открытие новых маршрутов из Беларуси, расширение логистических возможностей, создание соответствующей транспортно-логистической инфраструктуры, необходимых социально-экономических условий для реализации аналогичных проектов (а также входящих в их состав как экономические составляющие торгово-экономических, инвестиционных социальных и др. подпроектов) и выход на китайский рынок крупных белорусских компаний позволит улучшить эту ситуацию в будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Базаров В. Б. «Новый шелковый путь» и евразийские логистические проекты XXI столетия. *Известия Иркутского государственного университета. Серия История*. 2018. Т. 25. С. 132–138. DOI: <https://doi.org/10.26516/2222-9124.2018.25.132>
2. Енин Ю., Кохно П., Пэйюй Ци. Экспорт продукции агропромышленного комплекса Беларуси в Китай. *Общество и экономика*. 2019. Вып. 10. С. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.31857/S020736760007151-5>
3. Ходоскина О. А. Кирпичева С. А., Самсонова А. А., Швецова Е. А., Современные тенденции в развитии транспортно-логистических систем. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020>
4. Кригалева В. Н. Экономический пояс Шелкового пути : проблемы и перспективы. *Тенденции развития науки и образования*. 2017. С. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.18411/lj-28-02-2017-2-06>
5. Моисеев И. Е. Экономический пояс и шелковый путь : от тихого океана до Прибалтики. *Социальные и политические вызовы модернизации в XXI в.* 2018. С. 66–67. DOI: <https://doi.org/10.30792/978-5-7925-0537-7-2018-66-67>
6. Рахманов А. М. Экономический пояс шелкового пути : перспективы аграрной интеграции ЕАЭС. *Экономика сельского хозяйства России*. 2017. № 8. С. 85–90. DOI: <https://doi.org/10.32651/2070-0288-2017-8-85-90>
7. Тихомиров А. В. Китай как приоритет внешней политики Республики Беларусь (1992–2019 гг.). *Актуальные проблемы международных отношений и глобального развития*. 2019. Вып. 7. С. 71–89. DOI: <https://doi.org/10.33581/2311-9470-2019-7-71-89>
8. Шумейко И. Н. Высокоскоростные поезда учатся «летать». *Энергия : экономика, техника, экология*. 2019. № 12. С. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0233361919120024>
9. Janic M. Multicriteria Evaluation of Intermodal (Rail/Road) Freight Transport Corridors. *Logistics & Sustainable Transport*. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0001>
10. Jiang J. Silk Road Cultures and the Silk Road Economic Belt. *China's Global Rebalancing and the New Silk Road*. 2018. P. 15–22. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5972-8_2
11. Tavasszy L. A. Predicting the effects of logistics innovations on freight systems : Directions for research. *Transport Policy*. 2020. Vol. 86. P. A1–A6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.11.004>

О. А. ХОДОСКИНА^{1*}, А. А. ИГРАЄВА², В. Є. НАУМОВА³

^{1*}Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, ел. пошта hodoskinaolga@gmail.com, ORCID 0000-0003-2254-9638

²Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +375 (44) 711 81 02, ел. пошта aigraeva@gmail.com, ORCID 0000-0002-4973-115X

³Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +375 (44) 584 47 36, ел. пошта naumovavi18@gmail.com, ORCID 0000-0002-4587-8680

РЕЗУЛЬТАТИ Й ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БІЛОРУСЬКО-КИТАЙСЬКОЇ СПІВПРАЦІ «ЕКОНОМІЧНИЙ ПОЯС ШОВКОВОГО ШЛЯХУ»

Мета. Найбільш грандіозним економічним і геополітичним проектом у наш час є ініціатива «Новий шовковий шлях», яка може радикальним чином модифікувати транспортні та грошові потоки в Євразії і в усьому світі. Вона включає проекти «Економічний пояс Шовкового шляху» та «Морський шовковий шлях XXI століття» й передбачає створення великої інфраструктурної мережі на шляху від західних кордонів Китаю через країни Центральної Азії й Іран у Європу. Тому мета цієї роботи – докладне різнобічне вивчення й аналіз розвитку білорусько-китайської співпраці за проектом «Економічний пояс Шовкового шляху», а також визначення подальших його перспектив. **Методика.** У процесі дослідження використано статистичний, територіально-галузевий та ретроспективний аналіз функціонування економічних систем. **Результати.** Республіка Білорусь стала найважливішою ланкою у створенні «Економічного поясу Шовкового шляху». Вона має унікальну географічну перевагу й надзвичайно зручні економічні й культурні умови, є ключовою країною в Східній Європі, перебуває на стику Європейського Союзу та Євразійського економічного союзу, привертає увагу розвиненою транспортною інфраструктурою, високим рівнем освіти та професійними ресурсами. Проект «Новий шовковий шлях» орієнтований у першу чергу на залізничне сполучення. Основний потенціал для Республіки Білорусь у транзитних перевезеннях – використання контейнерів (фактично єдиний спосіб транспортування товарів у євразійському транзиті). **Наукова новизна.** На цій стадії розвитку проекту побудова повномасштабної функціональної та ефективної моделі для прогнозування результатів реалізації конкретного підпроекту неможлива. Проте на сучасному етапі наукову новизну представляє так звана «постановка задачі» на основі отриманих аналітичних даних. Вони дозволяють визначити наявні проблеми під час реалізації проекту, сформулювати можливі рішення та використати їх під час проведення економічного аналізу ефективності інших міжнародних проектів аналітичного типу (розв'язання аналітичних економічних задач). **Практична значимість.** Розглянуто перспективи й труднощі розвитку перевезень прискореними контейнерними поїздами товарів і вантажів із Китайської Народної Республіки (КНР) у Республіку Білорусь. Для подолання дисбалансу в зовнішній торгівлі з Китаєм запропоновано заходи щодо вирішення цієї проблеми, приділено увагу проекту будівництва високошвидкісної магістралі (ВСМ) «Євразія», яка повинна з'єднати Китай із Західною Європою через Росію та Білорусь.

Ключові слова: Білоруська залізниця (БЗ); Новий шовковий шлях; прискорені контейнерні поїзди; Китай; «БЕЛІНТЕРТРАНС – транспортно-логістичний центр»; товари, які експортують; імпорт

О. А. KHODOSKINA^{1*}, А. А. IGRAIEVA^{2*}, V. Y. NAUMOVA³

^{1*}Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +37 (529) 730 35 91, e-mail hodoskinaolga@gmail.com, ORCID 0000-0003-2254-9638

^{2*}Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +37 (544) 790 82 77, e-mail aigraeva@gmail.com, ORCID 0000-0002-4973-115X

³Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +37 (544) 777 45 15, e-mail naumovavi18@gmail.com, ORCID 0000-0002-4587-8680

RESULTS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE BELARUSIAN-CHINESE COOPERATION THE SILK ROAD ECONOMIC BELT

Purpose. The most ambitious economic and geopolitical project at present is the New Silk Road initiative, which can radically modify transport and cash flows in Eurasia and around the world. It includes the Silk Road Economic Belt and 21st Century Maritime Silk Road projects and involves the creation of an extensive infrastructure network on the way from the western borders of China through the countries of Central Asia and Iran to Europe. Therefore, the purpose of this work is a detailed comprehensive study and analysis of the development of the Belarusian-Chinese cooperation on the Silk Road Economic Belt project, as well as determination of its further prospects. **Methodology** In the course of the study, we used statistical, territorial-sectoral and retrospective analysis with elements of economic and mathematical modeling of the functioning of economic systems. **Findings.** The Republic of Belarus has become

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/225258>

© О. А. Ходоскина, А. А. Играева, В. Е. Наумова, 2020

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

the most important link in the creation of the Silk Road Economic Belt. It has a unique geographical advantage, extremely convenient economic and cultural conditions, being a key country in Eastern Europe, located at the junction of the European Union, and the Eurasian Economic Union. The country attracts with a developed transport infrastructure, a high level of education and professional resources. The New Silk Road project is focused primarily on railway communication. The main potential for the Republic of Belarus in transit traffic is associated with the use of containers. It is containerized cargo transportation that is actually the only way to transport goods in Eurasian transit. **Originality.** At this stage of project development, the construction of a full-scale functional, effective model that would allow predicting the results of the implementation of a specific subproject with the required accuracy is currently impossible. However, at the present stage, the originality is the so-called «problem statement» based on the obtained analytical data. They allow identifying existing problems during project implementation, formulating possible solutions and using them during economic analysis of the efficiency of other international projects of the analytical type (solving analytical economic problems). **Practical value.** The article discusses the prospects and difficulties of the development of transportations by express container trains of goods and cargo from the People's Republic of China (PRC) to the Republic of Belarus. To overcome the imbalance in foreign trade with China, measures were proposed to solve this problem; attention was paid to the project for the construction of Eurasia high-speed highway (HSR), which should connect China with Western Europe through Russia and Belarus.

Keywords: Belarusian Railways; New Silk Road; express container trains; China; «BELINTERTRANS – transport and logistics center»; exported goods; imports

REFERENCES

1. Bazarov, V. B. (2018). «New Silk Road» and Eurasian Logistics Projects of the XXI Century. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series History*, 25, 132-138. DOI: <https://doi.org/10.26516/2222-9124.2018.25.132> (in Russian)
2. Enin, Y., Kokhno, P., & Peiyu, Q. (2019). Export of agricultural products of Belarus to China. *Society and Economics*, 10, 75-81. DOI: <https://doi.org/10.31857/S020736760007151-5> (in Russian)
3. Hodoskina, O. A., Kirpicheva, S. A., Samsonova, A. A., & Shvetsova, E. A. (2020). Modern trends in the development of transport and logistics systems. *Science and Transport Progress*, 1(85), 25-34. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199736> (in Russian)
4. Krigaleva, V. N. (2017). Ekonomicheskii poyas Shelkovogo puti: problemy i perspektivy. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.18411/lj-28-02-2017-2-06> (in Russian)
5. Moiseev, I. (2018). Economic belt and the silk road: from the pacific to the baltic. *Social and Political Challenges of Modernization in the 21st Century*, 66-67. DOI: <https://doi.org/10.30792/978-5-7925-0537-7-2018-66-67> (in Russian)
6. Rakhmanov, A. M. (2017). The silk road economic belt: perspectives for eeu agro industry integration. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii*, 8, 85-90. DOI: <https://doi.org/10.32651/2070-0288-2017-8-85-90> (in Russian)
7. Tsikhmirau, A. V. (2019). China as a foreign policy priority of the republic of belarus (1992–2019). *Actual problems of international relations and global development*, 7, 71-89. DOI: <https://doi.org/10.33581/2311-9470-2019-7-71-89> (in Russian)
8. Shumeyko, I. N. (2019). Vysokoskorostnye poezda uchatsya «letat». *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 12, 7-11. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0233361919120024> (in Russian)
9. Janić, M. (2020). Multicriteria Evaluation of Intermodal (Rail/Road) Freight Transport Corridors. *Logistics & Sustainable Transport*, 11(1), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0001> (in English)
10. Jiang, J. (2018). Silk Road Cultures and the Silk Road Economic Belt. *China's Global Rebalancing and the New Silk Road*, 15-22. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5972-8_2 (in English)
11. Tavasszy, L. A. (2020). Predicting the effects of logistics innovations on freight systems: Directions for research. *Transport Policy*, 86, A1-A6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.11.004> (in English)

Поступила в редколлегию: 13.08.2020

Принята в печать: 14.12.2020

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.225:629.421

Н. М. САННИЦЬКИЙ^{1*}, Ю. М. ГЕРМАНЮК^{2*}, Т. О. ШАРГУН^{3*}

^{1*}Циклова комісія «Організація перевезень і управління на залізничному транспорті», Львівський коледж транспортної інфраструктури, вул. Снопківська, 47, Львів, Україна, 79011, тел. +38 (032) 276 14 90, ел. пошта nazar_ltzt@ukr.net, ORCID 0000-0003-0254-7301

^{2*}Каф. «Транспортні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Львівська філія, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

^{3*}Каф. «Гуманітарна та соціально-економічна підготовка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Львівська філія, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта t.shargun@gmail.com, ORCID 0000-0002-6014-4941

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗАКРІПЛЕННЯ ПРИВАТНИХ ЛОКОМОТИВІВ ЗА ПОЇЗДАМИ

Мета. У наш час в Україні відбувається процес реформування ринку залізничних перевезень, що пов'язано з імплементацією директив Європейського Союзу до її законодавства. У результаті цих реформ передбачається відкриття ринку залізничних перевезень для незалежних від Укрзалізниці перевізників. У таких умовах проблема забезпечення доступу рухомого складу до головних і приймально-відправних колій та усунення конфліктних ситуацій із поїзними та маневровими пересуваннями рухомого складу Укрзалізниці може бути вирішена шляхом пропуску поїздів незалежних перевізників за жорстким розкладом руху. Одним із напрямів використання приватних локомотивів є обслуговування пунктів масового завантаження чи вивантаження вантажів. Основним завданням, яке виникає при цьому, є вдосконалення методів закріплення приватних локомотивів за нитками графіка руху поїздів. **Методика.** Дослідження виконано на основі методів організації експлуатаційної роботи залізниць та методів лінійного програмування. **Результати.** У роботі розглянуто проблему вдосконалення методів розрахунку величини робочого парку локомотивів. На основі аналізу можливих умов взаємодії АТ «Укрзалізниця» і приватних перевізників визначено, що одним із варіантів використання приватних перевізних компаній на етапі впровадження їх послуг буде обслуговування пунктів масового завантаження чи вивантаження вантажів. У ході дослідження розроблено метод визначення кількості локомотивів шляхом зведення цієї задачі до оптимізаційної задачі про призначення. Наведено приклад розв'язання задачі визначення необхідного робочого парку локомотивів для обслуговування перевезень зернових вантажів, які відправляють у порт відправницькими маршрутами, та розробки графіків їх обігу. Установлено кількість локомотивів, необхідну для обслуговування перевезень, розроблено порядок їх підв'язки до поїздів. **Наукова новизна.** У дослідженні вдосконалено методи закріплення локомотивів за нитками графіка руху поїздів на основі використання методів лінійного програмування. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють оцінити потреби робочого парку локомотивів в умовах відкритого ринку залізничних перевезень для незалежних перевізників.

Ключові слова: залізничний транспорт; вантажні перевезення; локомотив; організація перевезень; реформування залізниці

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Вступ

На сьогодні магістральний залізничний транспорт України перебуває повністю в державній власності. Загальним напрямом державної політики України є євроінтеграція. Ключовим залишається доступ приватних перевізників до українських залізниць. Це можливо із запровадженням жорстких ниток графіка вантажного руху [2], що сприяє підвищенню безпеки руху, конкурентоспроможності залізничного транспорту та показників експлуатаційної роботи. Однак для України ці питання є доволі новими. Роботи українських учених порушують актуальні питання оптимального планування, управління локомотивним парком залізниць. Так, в [1] запропоновано методи створення вдосконаленої автоматизованої системи оптимального управління роботою локомотивного парку із застосуванням нечітких моделей для прогнозування характеристик поїздопотоків та для підв'язки локомотивів до поїздів. Над питанням перспективи використання приватних локомотивів працюють учені Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна [15, 2]. У роботі [15] визначено сфери ефективного використання приватних локомотивів для залізничних перевезень у межах України.

У [10] удосконалено методи визначення схем обігу локомотивів з урахуванням технологічних особливостей вагонопотоків. Розроблено математичну модель, яка дозволяє знайти масу поїздів на маршрутах їх прямування, схеми обігу локомотивів та роботи бригад з урахуванням дислокації парку з різними серіями на полігоні мережі. Для цієї математичної моделі застосовано цілочисловий генетичний алгоритм із власною схемою кодування рішення.

Проблемі планування роботи локомотивів і локомотивних бригад присвячено багато праць у закордонних виданнях. Вони вирішують завдання впровадження раціональної системи управління локомотивами та локомотивними бригадами в різних часових періодах і за різної технології виконання поїзної роботи, вибору порядку явки локомотивних бригад на роботу, завдання, що виникають під час організації перевезень за жорсткими графіками руху поїздів. Зокрема, у Чехії, США, Італії, Китаї

завдання розподілу локомотивів вирішують із використанням моделі цілочислового лінійного програмування [8, 11, 12, 17, 18]. Так, у Чехії складено програму, яка описує поетапну процедуру формування поїздів, подачі заявок на замовлення маршруту поїзда в межах розкладу руху та призначена для узгодження з маршрутом оператора перевезень [14].

У Російській Федерації питанням роботи парку локомотивів присвячено також багато публікацій, зокрема вчені розраховують обіг та обслуговування локомотивів за системою оптимізації «Лабіринт» як динамічну транспортну задачу. Запропоновано модель узгодженого прибуття локомотивів у пункти обслуговування. Розрахунок складається з трьох взаємопов'язаних етапів. Першим етапом є розрахунок оптимального обігу локомотива без урахування обмежень на обслуговування. Другий етап – розрахунок оптимального прибуття локомотивів на станції обслуговування. Третій етап – розрахунок розкладу руху поїздів з урахуванням місця розташування зупинених поїзних комплектів та зовнішнього вигляду локомотивів після обслуговування [16].

Робота [20] присвячена вирішенню завдання візуального планування місцеперебування локомотивів із використанням генетичного алгоритму – моделі макета робочої схеми руху локомотива. У [7] удосконалено систему організації локомотивних бригад за іменними графіками.

Доволі багато публікацій стосуються питання методів визначення потрібного парку локомотивів. Так, у роботі [4] описано алгоритм розрахунку робочого парку локомотивів залізничної дільниці графоаналітичним методом мовою програмування С. Парк вантажних локомотивів визначено за коефіцієнтом їх потреби на одну пару поїздів. У [5] запропоновано здійснювати нормування локомотивного парку з урахуванням впливу на потреби в локомотивах систем тягового обслуговування вантажних поїздів. Розроблено методику, що дозволяє визначити потрібну кількість локомотивів за їх оперативного секціонування та кратної тяги:

$$M_{y.o.} = (K_T \sum_{j=1}^m n_{rj} K_{nj}) \frac{1 + \alpha_p}{1 - \beta_n},$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

де K_T – коефіцієнт, що враховує кратність тяги у вантажному русі в середньому за місяць.

У роботі [6] на основі аналізу результатів моделювання роботи локомотивів, фактичних даних використання локомотивного парку, а також виконаних досліджень створено базову модель установалення коефіцієнта переходу від середньодобової за рік потреби в локомотивах робочого парку до загальної чисельності парку справних локомотивів вантажного господарства з урахуванням нерівномірностей руху поїздів. У [3] запропоновано модель, що дозволяє розрахувати оптимальні режими роботи локомотивів під час обслуговування поїздопотоків. За основу побудови моделі обрано динамічну транспортну задачу. Під час моделювання видається інформація про режим роботи кожного локомотива, графік руху кожного поїзда, а також усереднені результати використання локомотивів і затримки поїздів. У [13] представлено гібридний генетичний алгоритм для оптимального управління локомотивами, коли виникає проблема з ув'язкою наявних у депо локомотивів до поїздів у жорсткі проміжки часу. У [7], враховуючи розклад руху поїздів, учені розглядають проблему планування роботи локомотивів, визначають алгоритм підведення локомотивів до поїздів за жорстким графіком.

У роботі [19] зазначено, що розклад руху поїздів і підведення до них локомотивів часто виконують окремо. Очевидним недоліком такого процесу ієрархічного планування є те, що він часто призводить до поганої координації між розкладом руху поїздів і розкладом руху локомотивів. Ця стаття передбачає створення інтегрованої задачі розробки розкладу руху та призначення локомотивів за допомогою побудови тривимірної просторово-часової моделі. У роботі [9] описано алгоритм визначення мінімальної кількості транспортних одиниць для ведення фіксованого розкладу.

Виконаний аналіз наукових джерел свідчить про те, що наявні методи організації тягового обслуговування поїздів спрямовані на досягнення мінімальних транспортних витрат для виконання заданого обсягу перевезень, що не враховує інтереси окремих вантажовідправників в умовах дефіциту тягового рухомого складу.

Мета

Основною метою нашої статті є вдосконалення методів закріплення локомотивів за нитками графіка руху поїздів на основі використання методів лінійного програмування.

Методика

Одним із напрямів використання приватних локомотивів є обслуговування пунктів масового завантаження чи вивантаження вантажів. Зокрема, імовірними пунктами призначення поїздів, які обслуговують приватні локомотиви, можуть бути морські порти Великої Одеси, де концентрується майже 20 % вивантаження вагонів по Укрзалізниці. У роботі розглянуто задачу визначення необхідного робочого парку локомотивів для обслуговування перевезень зернових вантажів, які відправляють у порт із 7 елеваторів відправницькими маршрутами, та розробки графіків обігу локомотивів. Основне локомотивне депо, де виконують операції з ТО–2, розміщене в порту. Робочий парк локомотивів, необхідний для забезпечення перевезень, у цьому випадку визначають у результаті розв'язання оптимізаційної задачі:

$$M = \left\lceil \frac{\alpha_p}{T_n} \left(\sum_{i=1}^n T_{pi} + \sum_{i=1}^n S_i \right) \right\rceil, \quad (1)$$

де T_{pi} – тривалість перебування i -го локомотива в русі із завантаженим і порожнім поїздом та його простою на станції завантаження; S_i – загальний простій i -го локомотива на станції основного депо (станції вивантаження); n – кількість ниток графіка.

Зважаючи на те, що величина $\sum_{i=1}^n T_{pi}$ є постійною і визначається графіком обігу составів, мінімальна кількість локомотивів, необхідна для забезпечення перевезень, досягається за мінімального загального простою локомотивів на станції основного депо. Тому розв'язання задачі (1) є еквівалентним до розв'язання задачі

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$M = \left[\alpha_p \frac{\sum_{i=1}^n T_{pi} + S_{\min}}{T_{\Pi}} \right] \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$S_{\min} = s_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min \quad (3)$$

де за обмежень:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 0; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 0; \\ x_{ij} \in [0, 1]. \end{cases} \quad (4)$$

У такій постановці задача мінімізації загального простою локомотивів на станції основного депо зведена до задачі про призначення.

Ураховуючи цілочислове значення кількості локомотивів, необхідність їх резерву на випадок значних порушень розкладу руху поїздів, а також планового чи позапланового ремонту за нормальних умов експлуатації складатиме:

$$S_{\text{рез}} = MT_{\Pi} - \sum_{i=1}^n T_{pi} - S_{\min}. \quad (5)$$

Указаний резерв може бути перерозподілений із метою створення рівномірних резервів часу перебування локомотивів на станції основного депо. У цих умовах задача розробки графіка обігу M локомотивів під час обслуговування перевезень може бути сформульована так (6):

$$\min(b_{ij}) \rightarrow \max, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

де

$$b_{ij} = \begin{cases} s_{ij} \text{ за } x_{ij} = 1; \\ \infty \text{ за } x_{ij} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Обмеження задачі (6) накладено умовами (7) та додатково умовою:

$$MT_{\Pi} - \sum_{i=1}^n T_{pi} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} x_{ij} \geq 0. \quad (8)$$

Результати

Розв'язання поставленої задачі виконуємо у два етапи.

На першому етапі визначаємо мінімальну кількість локомотивів, необхідну для забезпечення перевезень, якої можна досягати скороченням простою локомотивів на станції основного депо, що відображено в цільовій функції. Таким чином, задача зводиться до мінімізації загального простою локомотивів під час їх перечеплення від i -того до j -того поїзда. На другому етапі досягається рівномірний розподіл резервів часу простою локомотивів на станції основного депо в разі їх перечеплення між нитками графіка. Оскільки існує потреба в додаткових локомотивах на випадок значних порушень розкладу руху поїздів, планового чи позапланового ремонту, за нормальних умов експлуатації кількість локомотивів повинна мати резерв. Його можна перерозподілити для створення рівномірних резервів часу перебування локомотивів на станції основного депо. Це забезпечує стійкість графіків обігу локомотивів в умовах дії випадкових факторів. Матриці підв'язки локомотивів та мінімальні тривалості їх простою прід час перечеплення від поїзда до поїзда наведені в табл. 1 і 2, порівняння початкового й остаточного варіантів – у табл. 3. Згідно з розробленою методикою у роботі побудовано оптимальний графік обслуговування елеваторів відправницькими маршрутами, що наведено на рис. 1.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі вдосконалено метод закріплення локомотивів за нитками графіка руху поїздів на основі використання методів лінійного програмування.

Отримані результати дозволяють оцінити потреби робочого парку локомотивів в умовах відкритого ринку залізничних перевезень для незалежних перевізників.

Таблиця 1

Матриця підв'язки локомотивів за нитками графіка, що забезпечує їх мінімальний простій під час переплетення від поїзда до поїзда (початковий варіант)

Table 1

Matrix of a locomotive garter according to schedule threads providing their minimum idle time during coupling from train to train (initial variant)

До поїзда		Час до відправлення поїзда в годинах від нуля годин першої доби														
		0	42	33	73	66	24	3	46	16	58	32	75	50	8	
Від поїзда		Номер поїзда														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Час до прибуття поїзда в годинах від нуля годин першої доби	48	1	36	78	69	25	18	60	39	82	52	10	68	27	2	44
	6	2	78	36	27	67	60	18	81	40	10	52	26	69	44	2
	73	3	11	53	44	84	77	35	14	57	27	69	43	–	61	19
	29	4	55	13	4	44	37	79	58	17	71	29	3	46	21	63
	20	5	64	22	13	53	46	4	67	26	80	38	12	55	30	72
	62	6	22	64	55	11	4	46	25	68	38	80	54	13	72	30
	41	7	43	85	76	32	25	67	46	5	59	17	75	34	9	51
	0	8	84	42	33	73	66	24	3	46	16	58	32	75	50	8
	54	9	30	72	63	19	12	54	33	76	46	4	62	21	80	38
	12	10	72	30	21	61	54	12	75	34	4	46	20	63	38	80
	68	11	16	58	49	5	82	40	19	62	32	74	48	7	66	24
	27	12	57	15	6	46	39	81	60	19	73	31	5	48	23	65
	82	13	2	44	35	75	68	26	5	48	18	60	34	77	52	10
	40	14	44	2	77	33	26	68	47	6	60	18	76	35	10	52

Таблиця 2

Матриця підв'язки 7 локомотивів за нитками графіка, що забезпечує їх найбільш рівномірний простій під час перечеплення від поїзда до поїзда (остаточний варіант)

Table 2

Matrix of 7 locomotives garter according to schedule threads providing their most uniform idle time during coupling from train to train (final variant)

До поїзда		Час до відправлення поїзда в годинах від нуля годин першої доби														
		0	42	33	73	66	24	3	46	16	58	32	75	50	8	
Від поїзда		Номер поїзда														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Час до прибуття поїзда в годинах від нуля годин першої доби	48	1	36	78	69	25	18	60	39	82	52	10	68	27	44	
	6	2	78	36	27	67	60	18	81	40	10	52	26	69	44	2
	73	3	11	53	44	84	77	35	14	57	27	69	43	61	19	
	29	4	55	13	44	37	79	58	17	71	29	46	21	63		
	20	5	64	22	13	53	46	67	26	80	38	12	55	30	72	
	62	6	22	64	55	11	46	25	68	38	80	54	13	72	30	
	41	7	43	85	76	32	25	67	46	59	17	75	34	9	51	
	0	8	84	42	33	73	66	24	46	16	58	32	75	50		
	54	9	30	72	63	19	12	54	33	76	46	62	21	80	38	
	12	10	72	30	21	61	54	12	75	34	46	20	63	38	80	
	68	11	16	58	49	82	40	19	62	32	74	48	7	66	24	
	27	12	57	15	6	46	39	81	60	19	73	31	48	23	65	
	82	13	44	35	75	68	26	5	48	18	60	34	77	52	10	
	40	14	44	2	77	33	26	68	47	60	18	76	35	10	52	

Таблиця 3

Порівняння початкового й остаточного варіантів

Table 3

Comparison of initial and final variants

Етап 1	підв'язка	1–13	2–14	3–12	13–1	14–2	8–7	4–3	6–5	5–6	10–9	9–10	11–4	7–8	12–11
	простій	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	5	5	5
Етап 2	підв'язка	13–7	12–3	14–8	11–12	8–14	7–13	1–10	2–9	3–1	6–4	9–5	10–6	5–11	4–2
	простій	5	6	6	7	8	9	10	10	11	11	12	12	12	13

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

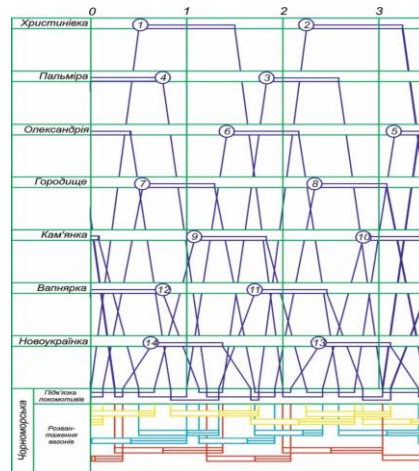


Рис. 1. Оптимальний графік обслуговування елеваторів приватними локомотивами

Fig. 1. Optimal schedule of elevators maintenance by private locomotives

Висновки

Використання приватних локомотивів дозволяє насамперед підвищити їх продуктивність, скорочуючи при цьому обіг вагонів, що призводить до зменшення їх потрібного робочого парку для здійснення перевезень.

У роботі розроблено метод закріплення приватних локомотивів за нитками графіка, що ґрунтується на розв'язанні задачі про призначення. Розглянуто задачу визначення необхід-

ного робочого парку локомотивів для обслуговування перевезень зернових вантажів, які відправляються у порт відправницькими маршрутами, та розробку графіків їх обігу. Установлено кількість локомотивів, необхідну для обслуговування перевезень, та розроблено порядок їх підв'язки до поїздів.

Отримано матрицю підв'язки локомотивів за відповідними нитками графіка та мінімальні тривалості їх простою під час перечеплення від поїзда до поїзда.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жуковицький І. В., Скалозуб В. В., Ветрова О. В., Зіненко О. Л. Моделювання процесу оперативного планування роботи локомотивного парку і локомотивних бригад. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2006. Вип. 12. С. 74–78.
2. Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Березовый Н. И. Проблемы использования частных локомотивов для выполнения перевозок на магистральном железнодорожном транспорте. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2012. Вип. 3. С. 40–46.
3. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Расчет оптимальных режимов работы локомотивов при обслуживании поездопотоков. *Мир транспорта*. 2016. № 4, Т. 14. С. 92–104.
4. Машарипов М. Н., Расулов М. Х., Расулмухаммедов М. М., Суюнбаев Ш. М. Расчет эксплуатируемого парка грузовых локомотивов графоаналитическим методом на языке программирования C#. *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2019. № 17. С. 5–12.
5. Некрашевич В. И. *Использование поездных локомотивов в грузовом движении*. Гомель : БелГУТ, 2001. 270 с.
6. Некрашевич В. И., Ковалев В. Н., Сальченко В. Л. Месячное нормирование парка локомотивов грузового движения. *Вестник ВНИИЖТ*. 2012 № 5. С. 24–31.
7. Сальченко В. Л. *Совершенствование системы организации работы локомотивных бригад по именованным графикам* : автореф. дисс. на соиск. уч. степени техн. Москва, 1996. 35 с.
8. Aksoy A., Altan A. The integrated Locomotive Assignment and Crew Scheduling Problem. *International Journal of Computational Engineering Research*. 2013. Vol. 03. Iss. 8. P. 18–24.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Bartlett T. E. An Algorithm for the Minimum Number of Transport Units to Maintain a Fixed Schedule. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1957. Vol. 4. Iss. 2. P. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.1002/nav.3800040205>
10. Butko T., Prokhorchenko A., Muzykin M. An improved method of determining the schemes of locomotive circulation with regard to the technological peculiarities of railcar traffic. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. Vol. 5, № 3 (83). P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80471>
11. Caprara A., Fischetti M., Toth P., Vigo D., Guida P. L. Algorithms for Railway Crew Management. *Mathematical Programming*. 1997. Vol. 79. Iss. 1–3. P. 125–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02614314>
12. Charnes A. A., Miller M. H. A model for the optimal programming of railway freight train movements. *Management Science*. 1956. Vol. 3. Iss. 1. P. 74–92. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.3.1.74>
13. Ghoseiri K., Ghannadpour S. F. A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogenous locomotive assignment with time windows. *Applied Soft Computing*. 2010. Vol. 10. Iss. 1. P. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.06.004>
14. Greiner K., Volek J. Distributed System for Train Route Ordering. *International journal of applied mathematics and informatics*. 2010. Vol. 4. Iss. 2. P. 17–24.
15. Kozachenko D., Gera B., Sannytskyi N., Hermaniuk Y., Shargun T. Estimation of Private Locomotives Usage Efficiency for Freight Transportation in Ukraine. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929406001>
16. Kozlov P., Timukhina E., Tushin N. Coordination of locomotives turnover and servicing modes. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Iss. 1. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp.2018.13.1.2>
17. Lei D., Guo C., Zhang Y., Chen C. Reasonable scheduling for arrival – departure track operations in railway stations. *Transportation Planning and Technology*. 2016. Vol. 39. Iss. 6. P. 624–639. DOI: <https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1187812>
18. Vaidyanathan B., Ahuja R. K., Orlin J. B. The Locomotive Routing Problem. *Transportation Science*. Vol. 42. Iss. 4. P. 492–507. DOI: [https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0244\(application/pdf\)](https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0244(application/pdf))
19. Xu X., Li C.-L., Xu Z. Integrated train timetabling and locomotive assignment. *Transportation Research Part B : Methodological*. 2018. Vol. 117. P. 573–593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.09.015>
20. Zheng Y., Jin W. Optimization Method of Locomotive Working Diagram Layout. *Journal of Advanced Transportation*. 2019. Vol. 2019. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1315638>

Н. М. САННИЦКИЙ^{1*}, Ю. Н. ГЕРМАНИЮК^{2*}, Т. О. ШАРГУН^{3*}

^{1*}Цикловая комиссия «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте», Львовский колледж транспортной инфраструктуры, ул. Снопковская, 47, Львов, Украина, 79011, тел. +38 (032) 276 14 90, эл. почта nazar_ltzf@ukr.net, ORCID 0000-0003-0254-7301

^{2*}Каф. «Транспортные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Львовский филиал, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, эл. почта yuhermaniuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

^{3*}Каф. «Гуманитарная и социально-экономическая подготовка», Днепропетровский национальный университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Львовский филиал, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, эл. почта t.shargun@gmail.com, ORCID 0000-0002-6014-4941

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЧАСТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ ЗА ПОЕЗДАМИ

Цель. В настоящее время в Украине происходит процесс реформирования рынка железнодорожных перевозок, что связано с имплементацией директив Европейского Союза к ее законодательству. В результате этих реформ предполагается открытие рынка железнодорожных перевозок для независимых от Укрзалізнички перевозчиков. В таких условиях проблема обеспечения доступа подвижного состава к главным и приемо-отправочным путям и устранения конфликтных ситуаций с поезными и маневровыми передвижениями подвижного состава Укрзалізнички может быть решена путем пропуска поездов независимых перевозчиков по жесткому расписанию движения. Одним из направлений использования частных локомотивов является обслуживание пунктов массовой загрузки или выгрузки грузов. Основной задачей, которая возникает при этом, является совершенствование методов закрепления частных локомотивов за нитками графика движения

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

поездов. **Методика.** Исследования выполнены на основе методов организации эксплуатационной работы железных дорог и методов линейного программирования. **Результаты.** В работе рассмотрена проблема совершенствования методов расчета величины рабочего парка локомотивов. На основе анализа возможных условий взаимодействия АО «Укрзалізниця» и частных перевозчиков определено, что одним из вариантов использования частных перевозочных компаний на этапе внедрения их услуг будет обслуживание пунктов массовой загрузки или выгрузки грузов. В ходе исследования разработан метод определения количества локомотивов путем приведения этой задачи к оптимизационной задаче о назначении. Приведен пример решения задачи определения необходимого рабочего парка локомотивов для обслуживания перевозок зерновых грузов, отправляемых в порт отправительскими маршрутами, и разработки графиков их оборота. Установлено количество локомотивов, которое необходимо для обслуживания перевозок, разработан порядок их подвезки к поездам. **Научная новизна.** В исследовании усовершенствованы методы закрепления локомотивов за нитками графика движения поездов на основе использования методов линейного программирования. **Практическая значимость.** Результаты работы позволяют оценить потребности рабочего парка локомотивов при открытом рынке железнодорожных перевозок для независимых перевозчиков.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; грузовые перевозки; локомотив; организация перевозок; реформирование железных дорог

N. M. SANNYTSKYI^{1*}, Y. M. HERMANIUK^{2*}, T. O. SHARHUN^{3*}

^{1*}Cycle commission «Organization of Transportation and Management at Railway Transport», Lviv College of Transport Infrastructure, Snopkivska St., 47, Lviv, Ukraine, 79011, tel. +38 (032) 276 14 90, e-mail nazar_Itzt@ukr.net, ORCID 0000-0003-0254-7301

^{2*}Dep. «Transport Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv Branch, I. Blazhkevycha St., 12a, Lviv, Ukraine, 79000, tel. +30 (032) 267 99 74, e-mail yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

^{3*}Dep. «Humanitarian and Social-Economic Training», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv Branch, I. Blazhkevycha St., 12a, Lviv, Ukraine, 79000, tel. +30 (032) 267 99 74, e-mail t.shargun@gmail.com, ORCID 0000-0002-6014-4941

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSIGNING PRIVATE LOCOMOTIVES TO TRAINS

Purpose. Ukraine is currently in the process of reforming the railway transportations market, which is related to the implementation of European Union Directives to its legislation. As a result of these reforms, the opening of the railway transportation market for carriers independent of Ukrzaliznytsia is envisaged. In such conditions, the problem of ensuring access of rolling stock to the receiving and departure tracks and the elimination of conflict situations with train and shunting movements of rolling stock of Ukrzaliznytsia can be solved by passing trains of independent carriers according to a tight schedule. One of the use areas of private locomotives is servicing of points of mass loading or unloading of goods. One of the tasks that arises in this case is to improve the methods of assigning private locomotives to the threads of the train schedule. **Methodology.** The research is performed based on the methods of organization of operational work of railways and methods of linear programming. **Findings.** The paper considers the problem of improving the methods of calculating the size of the working fleet of locomotives. Based on the analysis of possible conditions of interaction between Ukrzaliznytsia JSC and private carriers, it is determined that one of the possible options for using private transport companies at the stage of implementation of their services will be the service of points of mass loading or unloading of goods. In the course of the research a method of determining the number of locomotives by reducing this problem to an optimization problem of purpose was developed. An example of solving the problem of determining the required working fleet of locomotives to service the transportation of grain cargo sent to the port by shipping routes and developing schedules of their turnover is given. The number of locomotives needed to service transportations was set and the procedure for their connection to trains developed. **Originality.** The research improves the methods of assignment locomotives to the threads of the train schedule based on the use of linear programming methods. **Practical value.** The results of the work allow us to assess the needs of the working fleet of locomotives in the open market of railway transportations for independent carriers.

Keywords: railway transport; freight traffic; locomotive; organization of transportation; reforming of railways

REFERENCES

1. Zhukovits'kyu, I. V., Skalozub, V. V., Vetrova, O. V., & Zinenko, O. L. (2006). Modeljuvannja procesu operatyvnogho planuvannja roboty lokomotyvnogho parku i lokomotyvnykh bryghad. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 12, 74-78. (in Ukrainian)
2. Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Berezovyy, N. I. (2012). Problemy ispolzovaniya chastnykh lokomotivov dlya vypolneniya perevozok na magistralnom zheleznodorozhnom transporte. *Transport systems and transportation technologies*, 3, 40-46. (in English)
3. Kozlov, P. A., & Vakulenko, S. P. (2016). Raschet optimalnykh rezhimov raboty lokomotivov pri obsluzhivanii poezdopotokov. *Mir transporta*, 4(4), 92-104. (in Russian)
4. Masharipov, M. N., Rasulov, M. Kh., Rasulmukhammedov, M. M., & Suyunbaev, Sh. M. (2019). Raschet ekspluatiruemogo parka gruzovykh lokomotivov grafoanaliticheskim metodom na yazyke programmirovaniya C#. *Intellectual Technologies on Transport*, 17, 5-12. (in Russian)
5. Nekrashevich, V. I. (2001). *Ispolzovanie poezdnykh lokomotivov v gruzovom dvizhenii*. Gomel: BelGUT. (in Russian)
6. Nekrashevich, V. I., Kovalev, V. N., & Salchenko, V. L. (2012). Mesyachnoe normirovanie parka lokomotivov gruzovogo dvizheniya. *VNIIZHT Scientific Journal*, 5, 24-31. (in Russian)
7. Salchenko, V. L. (1996). *Sovershenstvovanie sistemy organizatsii raboty lokomotivnykh brigad po imennym grafikam* (Extended abstract of PhD dissertation). Moscow, Russia. (in Russian)
8. Aksoy, A., & Altan, A. (2013). The integrated Locomotive Assignment and Crew Scheduling Problem. *International Journal of Computational Engineering Research*, 03(8), 18-24. (in English)
9. Bartlett, T. E. (1957). An algorithm for the minimum number of transport units to maintain a fixed schedule. *Naval Research Logistics Quarterly*, 4(2), 139-149. DOI: <https://doi.org/10.1002/nav.3800040205> (in English)
10. Butko, T., Prokhorchenko, A., & Muzykin, M. (2016). An improved method of determining the schemes of locomotive circulation with regard to the technological peculiarities of railcar traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(83)), 47-55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80471> (in English)
11. Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D., & Guida, P. L. (1997). Algorithms for railway crew management. *Mathematical Programming*, 79(1-3), 125-141. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02614314> (in English)
12. Charnes, A. A., & Miller, M. H. (1956). Model for the optimal programming of railway freight train movements. *Management Science*, 3(1), 74-92. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.3.1.74> (in English)
13. Ghoseiri, K., & Ghannadpour, S. F. (2010). A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogenous locomotive assignment with time windows. *Applied Soft Computing*, 10(1), 53-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.06.004> (in English)
14. Greiner, K., & Volek, J. (2010). Distributed System for Train Route Ordering. *International journal of applied mathematics and informatics*, 4(2), 17-24. (in English)
15. Kozachenko, D., Gera, B., Sannytskyy, N., Hermaniuk, Y., & Shargun, T. (2019). Estimation of Private Locomotives Usage Efficiency for Freight Transportation in Ukraine. *MATEC Web of Conferences*, 294, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929406001> (in English)
16. Kozlov, P., Timukhina, E., & Tushin, N. (2018). Coordination of locomotives turnover and servicing modes. *Transport Problems*, 13(1), 19-26. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp.2018.13.1.2> (in English)
17. Lei, D., Guo, C., Zhang, Y., & Chen, C. (2016). Reasonable scheduling for arrival–departure track operations in railway stations. *Transportation Planning and Technology*, 39(6), 624-639. DOI: <https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1187812> (in English)
18. Vaidyanathan, B., Ahuja, R. K., & Orlin, J. B. (2008). The Locomotive Routing Problem. *Transportation Science*, 42(4), 492-507. DOI: [https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0244\(application/pdf\)](https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0244(application/pdf)) (in English)
19. Xu, X., Li, C.-L., & Xu, Z. (2018). Integrated train timetabling and locomotive assignment. *Transportation Research Part B: Methodological*, 117, 573-593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.09.015> (in English)
20. Zheng, Y., & Jin, W. (2019). Optimization Method of Locomotive Working Diagram Layout. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1315638> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.08.2020

Прийнята до друку: 08.12.2020

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.9

Л. С. КОРЯШКІНА^{1*}, Г. В. СИМОНЕЦЬ²

^{1*}Каф. «Системний аналіз і управління», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 565 76 83, ел. пошта koriashkina.l.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-6423-092X

²Каф. «Системний аналіз і управління», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (068) 848 42 00, ел. пошта galya.golovko.2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-1322-7189

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ КОМЕНТАРІВ ПІД НАВЧАЛЬНИМ МАТЕРІАЛОМ НА ВІДЕОХОСТИНГУ «YOUTUBE»

Мета. Автори мають на меті виявлення токсичних коментарів на відеохостингу «YouTube» під навчальним матеріалом шляхом класифікації неструктурованого тексту за допомогою комбінації методів машинного навчання. **Методика.** У роботі із зазначеним типом даних використано методи попередньої обробки для очищення, нормалізації, представлення текстових даних у вигляді, прийнятному для подальшої роботи на ЕОМ. Безпосередньо для віднесення коментарів до класу «токсичні» використано класифікатор логістичної регресії, метод класифікації за допомогою лінійних опорних векторів без та з методом навчання – стохастичним градієнтним спуском, класифікатор «випадковий ліс» та класифікатор з посиленням градієнта. З метою оцінки роботи класифікаторів використано методи підрахунку матриці помилок, точності, повноти та Ф-міри. Для більш узагальненої оцінки використано метод перехресної перевірки. Мова програмування – Python. **Результати.** На основі показників оцінки обрано найбільш результативні методи – метод опорних векторів (Linear SVM) без та з методом навчання за допомогою стохастичного градієнтного спуску. Описані технології можуть бути використані для аналізу текстових коментарів під будь-якими навчальними відео для виявлення токсичних відгуків. Також розроблений підхід може бути корисним для виявлення небажаної або навіть агресивної інформації в соціальних мережах або сервісах, де передбачені відгуки. **Наукова новизна.** У роботі використано комбінацію методів попередньої обробки специфічного виду тексту із врахуванням таких особливостей, як можливість наявності таймкодів, емоджі, посилань тощо, а також адаптовано класифікаційні методи машинного навчання для аналізу російськомовних коментарів. **Практична значимість.** Проведено оптимізацію (спрощення) процесу аналізу коментарів, необхідність якої обумовлена зростаючими обсягами текстових даних, особливо у сфері освіти через карантинні умови й перехід на дистанційну форму навчання. Обсяги навчального інтернет-контенту вже потребують автоматизації процесу обробки й аналізу відгуків із часом ця потреба тільки зростатиме.

Ключові слова: обробка природної мови; неструктуровані дані; класифікація; логістична регресія; метод опорних векторів; стохастичний градієнтний спуск; «випадковий ліс»; посилення градієнта; перехресна перевірка

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Вступ

Часто обставини вносять свої корегування в планомірний розвиток різних галузей людської діяльності. Наразі через карантинні умови зросла потреба в стрімкому інтегруванні інформаційних технологій у сферу освіти. Як результат, велику частину освітнього контенту почали оцифровувати, що породило низку коментарів. Із часом кількість коментарів тільки зростатиме, у наслідок чого їх опрацювання й аналіз можна буде здійснювати лише за допомогою різних засобів автоматизації цих процесів.

Соціальні медіа стали унікальним місцем для вільного висловлювання людьми своєї думки. Тим часом серед користувачів є групи, які зловживають цією свободою для реалізації свого токсичного мислення (образи, словесні сексуальні домагання, нецензурні висловлювання тощо). Система нагляду за ризикованою поведінкою молоді 2017 року (Центри контролю та профілактики захворювань) підрахувала, що за 12 місяців до опитування 14,9 % старшокласників зазнавали електронних знущань. Тому розумне використання науки про дані здатне сформулювати більш здорове середовище для віртуальних суспільств [12].

Коментарі – це текст, і в машинному навчанні вони мають назву «неструктуровані дані». Одним із найбільших джерел потенційно цікавих і важливих неструктурованих даних є сервіс «YouTube», який наповнений невичерпною кількістю навчальних відео і коментарів до них, які швидко зростають

На хостингу наявні відео інформаційних та комерційних гігантів, які вже мають навчальний контент. Для них і не тільки аналіз коментарів потенційно може допомогти розробникам навчального матеріалу отримати інформацію про його доступність, якість викладання, а також оцінити лояльність користувачів до продуктів та аудиторії, виявити нагальні потреби в знаннях і заохочення нових клієнтів.

Мета

Основною метою цього проекту є виявлення токсичних коментарів на відеохостингу «YouTube» під навчальними матеріалами шляхом класифікації неструктурованого тексту за

допомогою комбінації методів машинного навчання. Для цього насамперед потрібно проаналізувати наявні підходи й методи, які використовують під час обробки коментарів не тільки на зазначеному сервісі, але й взагалі в соціальних мережах.

Методика

У нашій роботі розглянуто основні базові підходи до обробки тексту й виділено стратегії та алгоритми, які можна використати для опрацювання текстових коментарів під відео в «YouTube». Окрім того, розроблено сервіс із вивантаження коментарів під відео на «YouTube», комплекс програм для їх класифікації на основі комбінації декількох методів інтелектуального аналізу даних.

Сьогодні зростаючі обсяги текстових даних переходять рубіж тих, як можна обробляти вручну. Отже, розробка методів та засобів, що автоматизують і пришвидшують обробку й аналіз текстової інформації, є актуальним напрямом досліджень у галузі інформаційних технологій.

Основні надбання за цією темою. Проблеми попередньої обробки неструктурованих даних присвячені роботи [10–11]. Так, у [10] показано, що проблема великої попередньої обробки та збільшення даних може бути вирішена неявно капсульними мережами. Авторам вдалося досягти показника якості бінарної класифікації AUC у 98,46 для набору даних коментарів KaggleToxic і продемонструвати, що він перевершує інші архітектури з великим відривом.

У [11] зазначено, що як модель попередньої підготовки ультрасучасної мовної моделі BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) досягла приголомшливих результатів у багатьох завданнях із розуміння мови. У цій роботі проведено вичерпні експерименти для вивчення різних методів точного налаштування BERT на завдання класифікації тексту та запропоновано загальне рішення.

Ще у 2011 році науковці Елхам Хабірі, Джеймс Каверлі та Чіао-Фанг Хсу з технічного університету в Техасі на п'ятій міжнародній конференції з вебжурналів та соціальних медіа в Барселоні (Іспанія) презентували свій підхід до аналізу коментарів на «YouTube». Вони ви-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

користали декілька прийомів для подолання часу обробки коментарів: (1) кластеризацію даних для визначення корельованих груп коментарів та (2) структуру ранжування на основі пріоритетів для автоматичного вибору інформативних коментарів, доданих користувачами. Дослідження включає кластеризацію коментарів та вибір найбільш репрезентативних серед них у кожному кластері. Запропонований метод ранжування на основі пріоритетів у поєднанні з кластеризацією на основі тематичних показників продемонстрував вищі показники порівняно з традиційними підходами (наприклад, LexRank, MEAD) [9]. Схематично означені підходи зображено на рис. 1.



Рис. 1. Підходи до аналізу коментарів, використані в роботі Елхам Хабірі

Fig. 1. Approaches to the analysis of comments used in the work of Elham Khabiri

Було виявлено, що поєднання цих двох основних характеристик дає багатообіцяючі результати. Зокрема, було оцінено запропонований алгоритм реферування коментарів для колекції відео «YouTube» та пов'язаних із ними коментарів і виявлено хорошу продуктивність порівняно з традиційними підходами реферування документів.

Майкл Чарі разом із колегами у 2014 р. опублікував статтю «Ознаки та симптоми впливу декстрометорфану з “YouTube”», у якій за допомогою комп'ютерних технік аналізу тексту коментарів виявив, що інформація, надана коментаторами на «YouTube», корисна для розкриття токсикологічних ефектів DXM [6].

Серед використаних технік: TF–IDF – вилучення ключових слів, підрахунок частоти слів за плато, та WordNet – графічне зображення англійської мови, яке об'єднує слова з подіб-

ними значеннями в кластери, що приблизно відповідають поняттям. Графічне зображення WordNet у вказаній роботі використано для виявлення подібних відгуків про препарат.

Іван Кассельман та Майкл Генріх за допомогою вмісту контенту на «YouTube» дослідили повідомлення про використання та враження користувачів від препарату під назвою «Salvia divinorum» [4].

У статті «Ієрархічна кластеризація на основі коментарів» Елхам Хабірі, Джеймс Каверлі та Чіао-Фанг Хсу пропонують ієрархічний підхід до кластеризації коментарів, який спирається на дві ключові особливості: (1) нормалізацію термінів коментарів та вилучення ключових термінів, щоб відігнати галасливі коментарі для ефективної кластеризації; (2) компонент вставки в режимі реального часу для поступового оновлення ієрархії, заснованої на коментарях, із тим, щоб ресурси могли ефективно розміщуватися в ієрархії по мірі виникнення коментарів, без необхідності повторного генерування (потенційно) дорогої ієрархії. Тут вивчено підхід кластеризації на сайті обміну відео «YouTube» [7].

У роботі [2] запропоновано виявляти коментарі та пости, що є образливими, за допомогою методів глибокого навчання. При цьому використано набір даних токсичних коментарів Kaggle для навчання моделі та класифікації коментарів за такими категоріями: токсичні, дуже токсичні, непристойні, погрози, образи й ненависть до особистості. Застосовуючи різні методи глибокого навчання й аналізуючи результати, автори надають рекомендації щодо вибору найкращої моделі глибокого навчання для класифікації тих чи інших коментарів.

Розробці автоматизованої системи аналізу будь-якого фрагменту тексту та виявлення різних типів токсичності присвячена робота [5]. У ній використано маркований набір даних коментарів у Вікіпедії, підготовлений Jigsaw. Авторам вдалося навчити модель, забезпечуючи середню точність перевірки 98,08 % та абсолютну точність перевірки 91,64 %.

Детальний огляд інших сучасних методів машинного навчання, які застосовують для класифікації токсичності коментарів у соціальних мережах, зробив Дарко Андрочеку [3].

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Класифікація. Для класифікації необхідно мати розмічені дані. Тому в роботі використано базу даних токсичних коментарів, у якій токсичні дані розмічені цифрою 1.0, а нетоксичні – 0.0. Доступ та вивантаження здійснено з відкритого сайту ІТ змагань Kaggle.

Попередню обробку тексту здійснено таким чином. За допомогою регулярних виразів модуля емої розроблено дві функції для очищення тексту: функція «give_emoji_free_text» видаляє смайли, які не використовуються як дані; функція «normalize_document» виконує видалення таймкодів, посилань, пунктуації, зайвих пробілів та переходів на інший рядок, виправлення слів із літерами, що декілька разів дублюються, наприклад, «аяясно» до «ясно». Також у цій функції виконують зведення до нижнього регістра, видалення стоп-слів та токенизацію за допомогою модуля nltk.word_tokenize. Нагадаємо, токенизація – це розбиття речень на одиниці даних (слова) [1].

Наступним кроком в обробці текстових даних є стемінг або лематизація (Stemming or Lemmatization). Обидва методи використовують для зменшення розмірності ознак шляхом об'єднання слів, наприклад, «бігти», «біжу», «бігли» в одне «біг» тощо. У нашій роботі застосовано останній, адже стемінг передбачає відсічення кінцівок слова, що часто може змінити його значення, особливо це стосується слів, які використовують в інтернет-словнику. Лематизація спрацьовує для відомих для неї слів, а інші залишає незмінними. Це допомагає обійти проблему неправильної заміни. Лематизацію виконано завдяки модулю StanzaLanguage, розробленому вченими Стенфордського університету.

Описані дії дають змогу зменшити розмірність векторів даних для поліпшення розуміння їх машиною [7].

Після попередньої обробки інформації проводять векторизацію ознак, або конструювання ознак, для чого використовують TfidfVectorizer.

Tfidf – feature engineering модель – це функціональна інженерна модель, яка заснована на використанні частоти ознаки в документі (реченні) (the term frequency-based feature engineering model).

Функція TfidfVectorizer від Scikit-Learn дозволяє нам безпосередньо обчислювати вектори

tfidf, беручи необроблені документи як вхідні дані та обчислюючи частоти термінів у документі (в коментарі), а також обернені частоти документів (зворотній показник частоти термінів в усьому корпусі документів). Передбачено також підтримку додавання n-грамів до векторів функцій. У результаті описаної обробки замість речень отримуємо вектори ознак для кожного коментаря.

Використання класифікаторів. Безпосередньо для віднесення коментарів до класу «токсичні» використано п'ять класифікаційних моделей: класифікатор логістичної регресії, метод класифікації за допомогою лінійних опорних векторів без та з методом навчання, застосовуючи стохастичний градієнтний спуск, а також класифікатор «випадковий ліс» і класифікатор з посиленням градієнта [3, 8].

Оцінка якості класифікаторів. Для оцінки якості моделей навчання було побудовано матрицю помилок (отриману інформацію представлено на рис. 2). Для кожної моделі підраховано: кількість правильно визначених моделлю нетоксичних, помилково визначених токсичних коментарів, помилково визначених нетоксичними коментарів та правильно визначених як нетоксичні коментарів. За останнім і найважливішим для нашого аналізу показником вірно визначених токсичними коментарів, а також невеликою кількістю помилкових результатів можна встановити, що найкращими в передбаченні обох класів є методи опорних векторів. Адже вони мають по 1 139 та 1 128 вірно визначених токсичних коментарів із 1 570 наявних, так що цей показник є вищим порівняно, наприклад, із машиною підсилення градієнта. Окрім того, за допомогою методу опорних векторів 3 004 та 3 016 коментарів визначено правильно як нетоксичні (із 3 184 можливих). Для більш детального аналізу й порівняння застосованих методів класифікації використано різні метрики їх оцінки.

Так, було розраховано метрики оцінки моделей класифікаторів, такі як точності, повноти та Ф-міри, наведені на рис. 3:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}; \quad (1)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}; \quad (3)$$

$$F = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}. \quad (4)$$

У формулах (1) – (4) TP – істинно позитивні рішення; TN – істинно негативні рішення; FP – хибно-позитивні рішення; FN – хибно негативні рішення системи. Ці ж позначення застосовано на рис. 2.

Із рис. 1 видно, що для наших даних, найбільш придатні методи опорних векторів адже вони мають показники точності 87 %.

Оцінку класифікаційної моделі прийнято проводити шляхом перехресної перевірки (CV Score). Сутність цієї оцінки описано в інформаційному розділі. Якщо коротко, це метод оцінки аналітичної моделі та її поведінки на незалежних даних. Під час оцінювання моделі наявні дані розбивають на k частин. Потім на $k-1$ частинах даних проводять навчання моделі, а частину даних, що залишається, використовують для тестування. Процедура повторюють k разів; у результаті кожен із k елементів даних використовують для тестування.

У такий спосіб отримаємо оцінку ефективності обраної моделі з найбільш рівномірним використанням наявних даних. Результати такої оцінки, коли $k = 5$, було консолідовано на рис. 4.

Чим вищий показник перехресної перевірки, тим кращою є модель. У нашому випадку – це метод опорних векторів (Linear SVM) без та з методом навчання з використанням стохастичного градієнтного спуску. Також указані методи демонструють найвищі інші метрики – точність, повноту та Φ -міру.

Після навчання, тренування та оцінки найбільш оптимальну модель використано на інших незалежних нерозмічених даних, завантажених із коментарів «YouTube».

Після того як побудовано робочу модель, останнім кроком є розгортання моделі, що, як правило, передбачає збереження моделі та необхідних залежностей, а також її розгортання як служби, API або як запущеної програми. Існують різні способи розгортання моделей ма-

шинного навчання, і це зазвичай залежить від того, як ви хочете отримати до нього доступ пізніше. У нашій роботі параметри моделі зберігаються на носії за допомогою модуля pickle, завдяки якому зручно використовувати в програмному середовищі моделі, навчені на інших даних.

	Logistic Regression	Linear SVM	Linear SVM (SGD)	Random Forest	Gradient Boosted Machines
TP	3088	3004	3016	3046	3173
FP	96	180	168	138	11
TN	944	1139	1128	712	128
FN	626	431	442	858	1442

Рис. 2. Матриці помилок для використаних моделей

Fig. 2. Error matrices for used models

Model	Logistic Regression	Linear SVM	Linear SVM (SGD)	Random Forest	Gradient Boosted Machines
Accuracy	0,85	0,87	0,87	0,79	0,69
Precision	0,86	0,87	0,87	0,80	0,76
Recall	0,85	0,87	0,87	0,79	0,69
F1 Score	0,84	0,87	0,87	0,77	0,59

Рис. 3. Розраховані метрики оцінки моделей класифікаторів

Fig. 3. Calculated metrics for evaluating classifier models

Model	Logistic Regression	Linear SVM	Linear SVM (SGD)	Random Forest	Gradient Boosted Machines
CV Score (TF)	0,82	0,86	0,86	0,78	0,69
Test Score (TF)	0,85	0,87	0,87	0,79	0,69
CV Score (TF-IDF)	0,82	0,86	0,86	0,78	0,69
Test Score (TF-IDF)	0,85	0,87	0,87	0,79	0,69

Рис. 4. Результати перехресної перевірки

Fig. 4. Cross-validation results

Приклад роботи машини опорних векторів. Після оцінки якості роботи класифікаторів виявилось, що найкращим для цієї задачі є машина опорних векторів. Завдяки збереженим під час роботи параметрам моделі є змога використати зазначений метод для класифікації коментарів під навчальним відео з назвою «Метод Крамера за 3 minuti. Решение системы линейных уравнений – bezbotvy». Під ним на мо-

Результати

Отже, у нашій роботі було вирішено низку прикладних задач.

По-перше, досліджено наявну практики роботи з коментарями під відео на каналі «YouTube». Робота містить огляд праць з аналізу коментарів у соціальних медіа, зокрема, із використанням ресурсів «YouTube» та приклади подібного використання для мережі «Twitter».

Окрім того, проведено оцінку якості класифікаційних моделей, побудованих на основі різних методів Data Mining із використанням показників точності, повноти, Ф-міри, матриці помилок. Для узагальнення оцінки проведено перехресну перевірку.

Загалом, ґрунтуючись на попередніх дослідженнях, із використанням технік машинного навчання під наглядом (supervised machine learning techniques) розроблено алгоритми класифікації неструктурованих текстових даних, представлених у вигляді коментарів. Головною вирішеною задачею є класифікація токсичності коментарів. Для цього використано класифікатор логістичної регресії, метод класифікації за допомогою лінійних опорних векторів без та з методом навчання – стохастичний градієнтний спуск, класифікатор «Випадковий ліс» та класифікатор із посиленням градієнта. Застосовано алгоритм оцінки роботи класифікаторів, що включає використання методів підрахунку матриці помилок, точності, повноти та Ф-міри для оцінки моделей. За всіма показниками найточнішим виявився метод опорних векторів (Linear SVM) без та з методом навчання стохастичний градієнтний спуск, у них найвищі й інші метрики оцінки, такі як точність, повнота та Ф-міра.

Наукова новизна та практична значимість

Комбінація методів попередньої обробки специфічного виду тексту, а також класифікаційних методів машинного навчання дозволила не тільки врахувати такі особливості інформації, як можливість наявності таймкодів, емоджі, посилань тощо, але й використати розроблені алгоритми для аналізу російськомовних коментарів.

Практична цінність отриманих у роботі результатів полягає насамперед у спрощенні процесу аналізу коментарів. Описані технології можуть бути використані для аналізу текстових коментарів у будь-яких соціальних мережах або сервісах, де передбачені відгуки. Аналіз коментарів, розташованих під навчальними відео, може бути корисним для розуміння доступності матеріалу, а також якості його викладання.

Висновки

Для класифікації коментарів серед розглянутих класичних методів машинного навчання доцільно використовувати метод опорних векторів без та з методом навчання стохастичний градієнтний спуск. Ці напрацювання дають змогу спростити аналіз коментарів.

Вирішені задачі попередньої обробки та поділу коментарів на «токсичні» й «нетоксичні» допоможуть сформувати доброзичливе середовище у сфері інформаційної освіти шляхом відкидання токсичних коментарів. Для коментарів під навчальними відео для школярів така практика є, безсумнівно, важливою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рассел М., Классен М. *Data Mining. Извлечение информации из Facebook, Twitter, LinkedIn, Instagram, GitHub*. Санкт-Петербург : Питер, 2020. 464 с.
2. Anand M., Eswari R. Classification of Abusive Comments in Social Media using Deep Learning. *2019 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (Erode, 27–29 mar. 2019). Erode, India, 2019. P. 974–977. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccmc.2019.8819734>
3. Andročec D. Machine learning methods for toxic comment classification : a systematic review. *Acta Univ. Sapientiae Informatica*. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 205–216.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4. Casselman I., Heinrich M. Novel use patterns of *Salvia divinorum* : unobtrusive observation using YouTube™. *Journal of Ethnopharmacology*. 2011. Vol. 138. Iss. 3. P. 662–667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.07.065>
5. Chakrabarty N. *A Machine Learning Approach to Comment Toxicity Classification*. Computational Intelligence in Pattern Recognition. 2020. P. 183–193. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_16
6. Chary M., Park E. H., McKenzie A., Sun J., Manini A. F., Genes, N. Signs & symptoms of Dextromethorphan exposure from YouTube. *PLoS One*. 2014. Vol. 9. Iss. 2. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082452>
7. Hsu C.-F., Caverlee J., Khabiri E. Hierarchical comments-based clustering. *SAC'11 : Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing*. 2011. P. 1130–1137. DOI: <https://doi.org/10.1145/1982185.1982434>
8. Jiang M., Liang Y., Feng X., Fan X., Pei Z., Xue Y., Guan R. Text classification based on deep belief network and softmax regression. *Neural Computing and Applications*. 2018. Vol. 29. Iss. 1. P. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2401-x>
9. Khabiri E., Caverlee J., Hsu C.-F. Summarizing User-Contributed Comments. *Proceedings of the Fifth International AAI Conference on Weblogs and Social Media*. 2011. P. 354–537.
10. Srivastava S., Khurana P., Tewari V. Identifying Aggression and Toxicity in Comments using Capsule Network. *Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying (TRAC-2018)*. P. 98–105.
11. Sun C., Qiu X., Xu Y., Huang X. *How to Fine-Tune BERT for Text Classification?* Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham, 2019. P. 194–206. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32381-3_16
12. Zaheri S. Leath J., Stroud D. Toxic Comment Classification. *SMU Data Science Review*. 2020. Vol. 3, No. 1. P. 1–13.

Л. С. КОРЯШКИНА^{1*}, Г. В. СИМОНЕЦ²

^{1*}Каф. «Системный анализ и управление», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 565 76 83, ел. пошта koriashkina.l.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-6423-092X

²Каф. «Системный анализ и управление», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38(068) 848 42 00, ел. пошта galya.golovko.2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-1322-7189

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОММЕНТАРИЕВ ПОД УЧЕБНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ВИДЕОХОСТИНГЕ «YOUTUBE»

Цель. Авторы ставят целью обнаружение токсичных комментариев на видеохостинге «YouTube» под учебным материалом путем классификации неструктурированного текста с помощью комбинации методов машинного обучения. **Методика.** В работе с указанным типом данных использованы методы машинного обучения для очистки, нормализации, представления текстовых данных в виде, приемлемом для дальнейшей работы на ЭВМ. Непосредственно для отнесения комментариев к классу «токсичные» использованы классификатор логистической регрессии, метод классификации с помощью линейных опорных векторов без и с методом обучения – стохастическим градиентным спуском, классификатор «случайный лес» и классификатор с усилением градиента. С целью оценки работы классификаторов использованы методы подсчета матрицы ошибок, точности, полноты и Ф-меры. Для обобщенной оценки использован метод перекрестной проверки. Язык программирования – Python. **Результаты.** На основе показателей оценки выбраны наилучшие методы – опорных векторов (Linear SVM) без и с методом обучения с помощью стохастического градиентного спуска. Описанные технологии могут быть использованы для анализа текстовых комментариев под любыми учебными видео для обнаружения токсичных отзывов. Также разработанный подход может быть полезным для выявления нежелательной или даже агрессивной информации в социальных сетях или сервисах, где предусмотрены отзывы. **Научная новизна.** В работе использовано комбинацию методов предварительной обработки специфического вида текста с учётом таких особенностей, как возможность наличия таймкодов, эмоджи, ссылок и тому подобное, а также адаптировано классификационные методы машинного

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

обучения для анализа русскоязычных комментариев. **Практическая значимость.** Проведено оптимізацію (упрощення) процесу аналізу коментарієв, необхідність якої обумовлена ростиючими об'ємами текстових даних, особливо в сфері освіти із-за карантинних умов і переходу на дистанційну форму навчання. Об'єми навчального інтернет-контенту уже потребують в автоматизації процесу обробки і аналізу відгуків, а со временем эта потребность будет только расти.

Ключевые слова: обробка естественного языка; неструктурированные данные; комментарии; классификация; логистическая регрессия; метод опорных векторов; стохастический градиентный спуск; «случайный лес»; усиление градиента; перекрестная проверка

L. S. KORIASHKINA^{1*}, H. V. SYMONETS²

^{1*}Dep. «System Analysis and Management», Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 565 76 83, e-mail koriashkina.l.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-6423-092X

²Dep. «System Analysis and Management», Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (068) 848 42 00, e-mail galya.golovko.2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-1322-7189

APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR PROCESSING COMMENTS FROM THE YOUTUBE VIDEO HOSTING UNDER TRAINING VIDEOS

Purpose. Detecting toxic comments on YouTube video hosting under training videos by classifying unstructured text using a combination of machine learning methods. **Methodology.** To work with the specified type of data, machine learning methods were used for cleaning, normalizing, and presenting textual data in a form acceptable for processing on a computer. Directly to classify comments as “toxic”, we used a logistic regression classifier, a linear support vector classification method without and with a learning method – stochastic gradient descent, a random forest classifier and a gradient enhancement classifier. In order to assess the work of the classifiers, the methods of calculating the matrix of errors, accuracy, completeness and F-measure were used. For a more generalized assessment, a cross-validation method was used. Python programming language. **Findings.** Based on the assessment indicators, the most optimal methods were selected – support vector machine (Linear SVM), without and with the training method using stochastic gradient descent. The described technologies can be used to analyze the textual comments under any training videos to detect toxic reviews. Also, the approach can be useful for identifying unwanted or even aggressive information on social networks or services where reviews are provided. **Originality.** It consists in a combination of methods for preprocessing a specific type of text, taking into account such features as the possibility of having a timecode, emoji, links, and the like, as well as in the adaptation of classification methods of machine learning for the analysis of Russian-language comments. **Practical value.** It is about optimizing (simplification) the comment analysis process. The need for this processing is due to the growing volumes of text data, especially in the field of education through quarantine conditions and the transition to distance learning. The volume of educational Internet content already needs to automate the processing and analysis of feedback, over time this need will only grow.

Keywords: natural language processing; unstructured data; comments; classification; logistic regression; support vector machine; stochastic gradient descent; random forest; strengthening the gradient; cross-validation

REFERENCES

1. Russell, M., & Klassen, M. (2020). *Data Mining. Extracting information from Facebook, Twitter, LinkedIn, Instagram, GitHub*. St. Petersburg: Piter. (in Russian)
2. Anand, M., & Eswari, R. (2019). Classification of Abusive Comments in Social Media using Deep Learning. In *2019 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (pp. 974-977). Erode, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccmc.2019.8819734> (in English)
3. Androćec, D. (2020). Machine learning methods for toxic comment classification: a systematic review. *Acta Univ. Sapientiae Informatica*, 12(2), 205-216. (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4. Casselman, I., & Heinrich, M. (2011). Novel use patterns of *Salvia divinorum*: Unobtrusive observation using YouTube™. *Journal of Ethnopharmacology*, 138(3), 662-667.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.07.065> (in English)
5. Chakrabarty, N. (2019). *A Machine Learning Approach to Comment Toxicity Classification*. *Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 183-193). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_16 (in English)
6. Chary, M., Park, E. H., McKenzie, A., Sun, J., Manini, A. F., & Genes, N. (2014). Signs & Symptoms of Dextromethorphan Exposure from YouTube. *PLoS ONE*, 9(2), 1-10.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082452> (in English)
7. Hsu, C.-F., Caverlee, J., & Khabiri, E. (2011). Hierarchical comments-based clustering. *SAC'11: Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing* (pp. 1130-1137).
DOI: <https://doi.org/10.1145/1982185.1982434> (in English)
8. Jiang, M., Liang, Y., Feng, X., Fan, X., Pei, Z., Xue, Y., & Guan, R. (2016). Text classification based on deep belief network and softmax regression. *Neural Computing and Applications*, 29(1), 61-70.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2401-x> (in English)
9. Khabiri, E., Caverlee, J., & Hsu, C.-F. (2011). Summarizing User-Contributed Comments. *Proceedings of the Fifth International AAI Conference on Weblogs and Social Media* (pp. 354-357). (in English)
10. Srivastava, S., Khurana, P., & Tewari, V. (2018). Identifying Aggression and Toxicity in Comments using Capsule Network. *Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying (TRAC-2018)* (pp. 98-105). (in English)
11. Sun, C., Qiu, X., Xu, Y., & Huang, X. (2019). *How to Fine-Tune BERT for Text Classification?* In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 194-206). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32381-3_16 (in English)
12. Zaheri, S. Leath, J., & Stroud, D. (2020). Toxic Comment Classification. *SMU Data Science Review*, 3(1), 1-13. (in English)

Надійшла до редколегії: 14.08.2020

Прийнята до друку: 14.12.2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 539.6:656-044.923:[711.552]

I. O. BONDARENKO^{1*}, L. O. NEDUZHA^{2*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 802 21 80, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{2*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

THE PROBLEM OF A LACK OF MATERIAL BEHAVIOUR DATA FOR RISK ASSESSMENT

Purpose. The main purpose of this work is to provide theoretical support for the need to expand data on changes in the material behaviour under dynamic loads when railway track risk assessment over time due to railway track elements deformability. **Methodology.** For the research, an original model of railway track design described using the original method based on the ability of elastic waves to propagate energy of power pulses in space and time, as well as a model describing materials as discrete substances were used. **Findings.** It has been established that the properties of the material affect the deformability of the elements and the design of the railway track; the main parameter in the study of deformability processes is time; material, as a substance, consists of atoms and molecules, and therefore is not continuous; internal physical processes determine changes in the behaviour of the material of an element. **Originality.** It has been proposed to develop classifications of changes in the physical properties of materials according to the probability of irreversible deformations and the impossibility of deformations, as well as classifications of changes in the mechanical properties of materials according to the probability of the defect appearance and changing the material structure. **Practical value.** The ability to simulate analytically any physical processes occurring inside elements due to the proposed method allows combining the influence of mechanical and physical effects into a single calculation. This enables to assess the probability of appearing defects in elements under certain dynamic loads when assessing the railway track risk over time due to railway track elements deformability.

Keywords: risk; deformations; materials; defect; deformability; physical and mechanical characteristics

Introduction

Generally, the design of the railway track is the presence of a rail-sleeper grid laid on one of the two structures of the base: a) the ballast layer and the foundation soil (including sub-ballast layers) or bridges; b) artificial structure (bridges, flyovers, tunnels).

Elements of the rail-sleeper grid, bridges, and tunnels are solid-state structures, the materials of which are metal, wood, reinforced concrete, and polymers. The materials used for the ballast, sub-ballast layers and foundation soil are bulk materials and represented by various soils.

The abilities of materials of railway track elements to absorb and transmit mechanical influ-

ences are very different. The material properties of the track elements determine the nature of the deformation of the railway track elements under mechanical stress. Physical (density, water saturation, electrical and thermal conductivity, magnetization, temperature coefficients of linear and volume expansion, etc.) and mechanical (strength, elasticity, ductility, brittleness, impact resistance, hardness, abrasion, wear, etc.) properties of materials determine the reaction of elements and track designs under the rolling stock's effects and the environment and also affect the technical conditions of elements and track designs.

During operation, under the influence of rolling stock and the environment, changes occur both in the technical conditions of the elements and in the

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

railway track design. Therefore, there are such limiting technical conditions of both elements and track designs that are criteria for unsuitability for their normal operation (that is, unsuitability for the second limit state, which is also called deformability unfitness). Without these criteria, the task of ensuring the minimization of the life cycle costs of the elements and track designs while maximizing the RAMS (reliability, availability, maintenance, and safety, IEC 62278: 2002, EN 50126-1-2017, IEC 60300-3-3: 2017) of functioning systems is impossible.

During operation under the rolling stock's influence and the environment, there are:

- material deformability – the ability of the material to respond to physical factors (thermal, aqueous, acoustic, electrical, gravitational, radiation (nuclear, X-ray, etc.)) by changing shape and size depending on the physical properties of the material;
- elements deformability – the ability of elements, like products made from a certain material with a certain geometry, to respond to mechanical stresses depending on the physical and mechanical material properties and operating modes (loading speed, temperature, exposure to the environment and other factors),
- design deformability – the total deformability of its elements at which design's elements not only can change shape, size, and volume but also move due to the deformability of other elements that make up the design.

The study of the deformability processes occurs simultaneously in several directions. So, specialists in studying the properties of the materials are exploring the possibility of improving their quality by using various additives to adapt the operation of the elements under the influence of various climatic and operational conditions [4, 17]. To increase the wear resistance and extend the life of the elements, structure designers study the influence of the geometric shapes of the elements on the features of the design for certain contact conditions of the elements that occur during operation [1, 6, 16]. Design experts examine the correlations of operating conditions with the occurrence of faults and defects [11, 13, 18, 26] to assess risks. And with the help of diagnostic studies, based on statistical measurements, there is an assessment, control, and verification of correlation dependencies [7, 19, 21, 23–24]. Scientific institutions, using the results of

the above specialists, develop models [12, 14–15, 20, 22, 25] for studying and predicting the operation of elements and structures in various conditions, which are subsequently used as tools for studying deformability.

This approach to studying of the deformability processes uses a huge amount of information obtained not only by the above-mentioned specialists but also by experts in the development of methods and equipment for measuring, recording, and processing the necessary measurement values. And the main parameter that unites all researchers is time, i.e. the ability to measure, record, evaluate, monitor, and predict the processes of deformability for both short and long time periods. Therefore, the paper presents the results of the theoretical support for the need to expand data on changes in time of the physical and mechanical characteristics of materials of track design elements under the influence of rolling stock and the environment when railway track risks assessment over time due to railway track elements deformability.

Purpose

The main purpose of this work is to provide theoretical support for the need to expand data on changes in the material behaviour under dynamic loads when railway track risk assessment over time due to railway track elements deformability. The object of the study is the deformability as a factor of appearing defects in elements under dynamic loads when railway track risk assessment over time. The subject of the study is the internal physical processes to determine changes in the behaviour of the material of an element when railway track risk assessment over time due to railway track elements deformability.

Methodology of investigation

When a rolling stock travels along a track structure, the process of transferring dynamic effects from rolling stock to a track structure and the reaction of a track to a rolling stock effect is carried out by wheel-rail contact. This process is quite complex, its features are:

- the statistical variation of the types of wheel contact with the rail, the contact point relative to the rail head, the parameters of the contact areas of the wheels and rails, as well as the direction of the

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

interaction forces on the contact areas depending on the position of the wheelset relative to the rail track, as well as the technical conditions of the wheels and rail tracks;

– the statistical spread of the magnitude and direction of the interaction forces depending on the movement mode of the rolling stock, type of track structures and rolling stock, track plan and profile;

– the complex cyclic nature of the repeatability of the impact of the rolling stock wheels on the track section, depending on the designs of locomotives and wagons in a train.

On the one hand, deformability predicting of railway track elements in time is the task of determining the conditions under which a single action of a wheel on railway track sections will cause deformations or defects in the railway track elements and design. On the other hand, it is a task to determine how the impact of a certain spectrum of rolling stock on a certain track section during the operation of the track affects the gradual accumulation of deformations and the development of defects in the railway track elements and design. Both tasks are unsolvable without data on changes in time of the physical and mechanical characteristics of materials of track design elements under the influence of rolling stock and the environment.

In other words, to predict changes in the state of any railway track element, under the dynamic influence of the rolling stock during operation, it is necessary to have information about emergence reasons of internal deformations and stresses with different characteristics (direction, value, rate of change of value, time of exposure and the number of occurrence of exposure). And how they affect the changes in the physical and mechanical material characteristics, depending on the structure, humidity, and temperature of the material at the time of exposure of strains and stresses inside the elements.

Based on theories of elasticity and propagation of elastic waves a method was developed to determine the processes leading to a change in time of the local values of strains and stresses inside the elements, [2, 3, 8–10]. The main advantage of the proposed modeling method is the use of the ability of elastic waves to propagate the energy of force actions (pulses) in space and time.

The materials properties determine the propagation velocity inside the elements of transverse

and/or longitudinal waves. The magnitude and the direction of the mechanical action determine the direction and value of the movements of the particles inside the element. Fig. 1, *a* shows the direction of the movement of both all kind of wave propagation with respect to the direction of the acting force and of particles under the longitudinal waves action. Fig. 1b shows the directional movement of particles under the transverse waves action. Figure 1 displays the directions of particle movement for one of the cross-sections of the spatial distribution of spherical transverse and longitudinal waves.

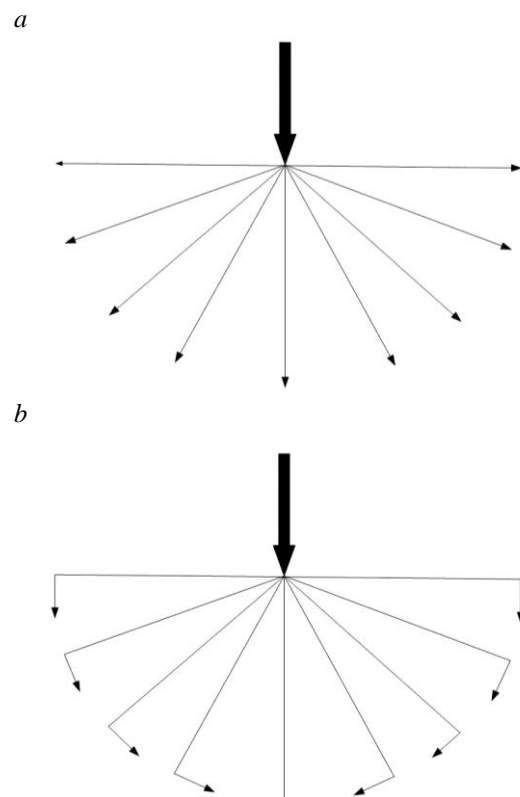


Fig. 1. Movement direction of both kinds of wave propagation with respect to the direction of the acting force and particles under the action of:
a – longitudinal waves; *b* – transverse waves

Along the direction of force action, all the energy of the force action moves the particles by means of longitudinal waves. In a direction perpendicular to the direction of force, the particles move only through transverse waves. In all other wave propagation directions, the particles are moved by two types of waves. The processes of reflection and refraction of waves depend on the

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

geometry of the elements and their connection in the structure.

Unlike existing calculation methods, the proposed calculation method allows us to analyze:

- the oscillations amplitude and frequency of each object in the model, under the influence of variable moving pulses in time;
- the reaction of each object in the model to the action of an impulse in time;
- qualitative and quantitative changes in deformation processes in modelling objects in time;
- the amount of energy spent on absorbing of momentum by each object in the model; elastic and residual deformations; internal and external friction forces; dissipative processes inside objects.

Thus, using the proposed method allows us to evaluate the simulation object for reliability, availability, maintainability, and safety under various operating conditions of the object.

The main aim of this simulation was the ability to simulate analytically any physical processes occurring inside elements. Due to the fact that any effect can be represented as a vector of the change in the amount of energy over time at any point of the simulation object, depending on the physical and mechanical and geometric parameters of the simulation object, the proposed method allows combining the influence of mechanical and physical effects into a single calculation.

However, one question remains unresolved. It is connected with the fact that the construction of a material model is based on the concept of the material continuum, that is, it is assumed that the substance of the object completely fills the space. Modelling objects in this way ignores two facts:

- a material, as a substance, consists of atoms and molecules, and therefore is not continuous;
- internal stresses characterize the interaction of internal forces directed against the attractive force of bound atoms or molecules of a material.

Consideration of these facts necessitates the expansion of data on changes in time of the physical and mechanical materials characteristics of track structure elements under the influence of rolling stock and the environment.

A mechanical impulse, acting on an object, transfers a certain amount of energy to it, which is absorbed and transmitted inside the element by force waves creating force fields. The latter cause the material particles to move, causing various

physical processes to occur inside the element with a change in time:

- material local density (change in the distance between particles under the influence of force waves);
- material local temperature (due to friction during the displacement of particles or inelastic collision of force waves);
- material compressibility (due to a change in the local density of the material and due to this change in the movement of particles under the force waves action);
- element volume (as a combination of the physical processes described above).

These physical processes cause: changes in the particle's local concentration, changes in the local volume inside the element, changes in the local velocity of particles and, according to the second law of motion, can be written as:

$$F(t) = R(t) = d(mv) / dt = \\ = d(pVv) / dt = d(nm_0Vv) / dt, \quad (1)$$

where $F(t)$ – is the impulse external force acting on the object; $R(t)$ – is the momentum of the force field acting inside the object; m – is the mass of the object, absorbing the influence of an external impulse, by means of a force field pulse, which is formed on the basis of a superposition of force waves; a – is the acceleration of particles exposed to the force field; p – is the material density of the object; V – is the object's volume, absorbing the influence of an external impulse, by means of a force field pulse, which is formed on the basis of a superposition of force waves; t – is the time; v – is the velocity of particles exposed to the force field; m_0 – is the mass of one molecule; n – concentration, the number of molecules per unit volume.

According to the first law of thermodynamics, for any volume it is true:

$$\delta K(t) + \delta U(t) + \delta A(t) = \delta Q(t), \quad (2)$$

where $\delta K(t)$ is the change in the kinetic energy of the body; $\delta U(t)$ – change in the internal energy of the body; $\delta A(t)$ – change in work performed by

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

external forces; $\delta Q(t)$ – is the change in thermal energy.

In this formula, the values of the terms $\delta A(t)$ and $\delta Q(t)$ are exactly known. The value of $\delta K(t)$ is not known since the initial velocity and direction of motion of bound atoms or molecules of the material in the studied location of the object is unknown. And also, there is no information on how a change in the distance between bound atoms or molecules affects $\delta U(t)$. Therefore, there is a need to classify the parameters of the change in the sum of energies $\delta A(t) + \delta Q(t)$ (value, rate of change of the value, time of exposure to energy and the number of occurrences of energy impacts per unit volume of the material), depending on the structure, humidity, and temperature of the material at the time of exposure, from the point of view of changing the physical properties of the material, and also, from the point of view of changing the mechanical properties of the material. First type of classifications has to describe the probability of the occurrence of irreversible deformation and the impossibility of deformation, and the second has to characterize the probability of the appearance defect and changing the structure of the material.

Thus, the availability of four classifications will allow us to solve the problems of predicting the deformability of railway track elements in time. Next, several types of tasks are considered, the solution of which will be possible.

Examples showing the need of using for additional classifications

Example 1. Prediction based on the study of the physical nature of the accumulation of contact-fatigue rail damage.

To study this issue, complex tests were carried out on the ring of the All-Russian Research Institute of Railway Transport [5]. The test was carried out on a straight section of the track and a curve with a radius of 400 m. During the test, three test cycles were carried out, differing in axial load: 23, 25, and 27 t/axis. In each cycle was used:

- 100 new identical four-axle wagons loaded with crushed stone;
- three stacking of rails. At the first stacking of the rails, the contact of the wheels and the outer

rails was carried out with two-point contact (the tread of the wheels along the surface of the rail and the wheel flange along the inner side surface of the rail). Rails of the second laying provided 60 % of cases with two-point contact and 40 with single-point contact (in the upper zone of the working curve of the rail head). The rails of the third stacking provided 85 % movement in a single-point contact with the pressed wheel flange to the side edge of the rail and 15 % in two-point.

In addition, a special experiment was carried out without changing the wear of the wheels, and with changing contact conditions of the wheels and rails due to the difference in the rail canting 1/20, 1/40 and without a rail canting.

As a result of the tests, it was determined that:

- the conditions of wheels and rails contact affect more significantly on the service life of rails than the effect of axial load;

- types of defects on the outer rail of the curves along which the rails failed were characteristic for each rail laying, that is, for a different contact shape. On the rails of the first installation, there were defects in the wear of the head and web of a rail (defects 52.1 – longitudinal cracks at the junction of the rail web with the head and base of a rail, 53.1 – cracks in the rail web from bolt holes, 17.1 – shelling and peeling of metal on the rolling surface) and there was no not a single failure in contact fatigue damage (defects 11 – chipping and peeling of metal on the side working fillet of the rail head and 21 – transverse cracks in the rail head). When operating rails of the second installation, approximately 40 % of failures were due to contact fatigue damage (defects 11 and 21), and when operating rails of the third installation, all failures were due to contact fatigue damage (defects 11 and 21);

- in straight track sections defects 11 and 21 occur many times less often than in curved track sections;

- defects 11 and 21 practically do not occur on the inner rail of the curves.

The conclusions obtained in the test are well explained using the proposed method for elastic waves propagation.

When modeling the movement of a wheelset along a track, it is necessary to take into account the main features of this movement. The movement of the wheelsets is carried out along the track

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

along a sinusoid, even with the perfect technical condition of the rails and wheels, as well as the technical condition of the rail track and wheelsets which is caused by the conical shape of the wheel flange. Therefore, the main type of contact of the inner and outer rails with the wheels in straight track sections is a single-point contact (rail rolling surface), but with different contact areas and the direction of the forces acting on these sites. In the curved track sections, the wheelset is shifted to the outer rail, therefore, the contact of the wheels and rails along the inner thread is carried out through a single-point contact between the wheel tread and the rail rolling surface. And on the outer thread, the wheels and rails are in contact at a two-point contact and/or single-point (in the upper zone of the working curvature of the rail head), the ratio of the types of contacts depends on the radius of the curve, the superelevation of the curved track section, as well as on the technical condition of the wheels and rails.

According to the characteristics, rail steel refers to solid-state solid materials, inside which both longitudinal and transverse waves propagate.

In fact, the modelling of the force effect on the contact areas of wheels and rails is complicated by taking into account such temporary aspects of contact as:

- the time of action and the pattern of change of the forces acting between wheels on the rails,
- at two-point contact, there is both the difference in the time of application of forces to each contact area and the offset between the contact areas along the rolling surface and the side surface of the rail, which depends on the angle of attack of the wheel on the rail.

Even without taking into account the indicated complicating parameters, one can state the fact that during single-point contact of wheels and rails, bound atoms or molecules move under the influence of a superposition of two wave processes caused by the propagation of longitudinal and transverse waves. The processes have different propagation velocities, so the longitudinal wave velocity is approximately 5600 m/s, and the shear wave velocity is 3200 m/s, respectively. The direction of displacements of bound atoms or molecules under the influence of each type of wave is different (Fig. 1). It is necessary to consider the superposition of two single-point contacts, taking

into account the direction of forces acting on each area contact, at two-point contact of wheels and rails. That is the superposition of four-vector processes in time.

In these processes, the energy of the longitudinal waves is expended on processes of changing the volume and shape in the directions of wave propagation, and the energy of the transverse waves to shift the particles to the vacant place. Both types of waves, in this case, characterize the elastic properties of the material, but the energy of the longitudinal waves characterizes the perception of the pulse by the material (its deformability), and the energy of the transverse waves characterizes the elasticity of the bonds of the particles of the material with each other. In addition, in two-point contact, two inelastic impacts of waves will take place when the energy vectors of longitudinal and transverse waves are added.

The next aspect that affects the processes that occur when the wheels and rails interact is the direction of the forces on the contact areas. The direction of these forces characterizes the place of their reflection inside the rail. Such places can be fillets of the rail head (the curvilinear part of the connection of the head and web of the rail), the contours of the web or base of the rails, as well as the opposite side face of the rail head. Reflection sites affect the appearance and parameters of new wave processes. And, according to the theory of propagation of elastic waves, each longitudinal or transverse wave causes four types of waves: two reflected and two refracted. The characteristics of the reflected waves affect the deformation processes inside the rail. Considering the fact that the time of the interaction of wheel and rail section is much longer than the time it takes the waves to travel through the inner space of the rail, it is ultimately necessary to consider the superposition in time both processes of incidence and refraction inside the rail.

However, when studying the physical nature of the accumulation of contact-fatigue injuries of rails, the forces at a single-point contact (in the upper zone of the working curvature of the rail head) are significant, since the distance to the fillet on the opposite side of the rail is much closer than with other contact options. In this case, the magnitude of the influence of force effects is more significant than under the influence of point-to-point

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

contact. The time between the effects of the incident and reflected wave processes returning to the point of application of force is less, and the probability of receiving a reflected wave that coincides with the direction of the wave of incidence is higher. Thus, when a wheel contacts a rail on a rounded lateral surface, non-metallic inclusions or bound atoms or a molecule of rail steel encountered in the propagation path of force waves of incidence and reflection will experience tension forces, which also increases the likelihood of deformative changes in the rails.

As indicated above, the maximum value of the force action is transferred by longitudinal waves that coincide in direction with the acting force. Therefore, with two-point contact, the maximum force effects inside the rail will be at the intersection of the wave processes of energy transfer by longitudinal waves that occur at each of the contact areas of the rail and wheel and coincide with the direction of acting forces. But, firstly, the result of the addition of vectors in an inelastic impact is lower than under the action of longitudinal waves, which coincide with the direction of the force during a single-point contact of the wheel with the upper zone of the working curvature of the rail head. Secondly, as indicated when considering the features of the movement of wheels along rails, the intersection of such processes has a lower probability of occurrence, that is, processes occurring inside the rail always occur with fewer deformability changes.

Thus, the application of the method for elastic waves propagation allows us to receive conclusions about the physical nature of the accumulation of contact-fatigue rail damage, which are similar to the conclusions obtained in an experimental study. Expensive tests could have been applied as a tool for verifying changes in the physical and mechanical properties of a material. To sum up, the results of considering the probability of deformability changes in the rail head at various contacts will still remain comparative without knowing about material behavior during deformability process.

Example 2. Prediction based on the study of the physical nature of damage to reinforced concrete sleepers.

The classification of defects in reinforced concrete sleepers contains defect 41 (destruction of concrete), the reason for which is insufficient frost

resistance and durability of concrete due to unsuitable starting materials for the sleeper concrete. The defect occurs on the top of the sleepers, on four beveled surfaces that are adjacent to the rail attachment area on both sides Fig. 2, destruction areas 1, 2. These areas do not have a load, such as a rail mounting areas, and do not come into contact with the ballast layer, like the lower part under the areas under consideration, although such defects do not occur on the load transfer surface from the gasket to the sleepers or on the contact surface of the sleepers lower bed. In addition, two areas that are located on the inside of the sleepers (between symmetric areas 2) are interconnected by a connecting part of the same concrete, which also does not undergo this destruction. Therefore, there is bewilderment, why the destruction occurs precisely at these sites. An explanation of this effect can also be demonstrated using the theory of elastic waves propagation, but, as in the previous case, with an example of defects in the rail, without data on material changes, this also remains a qualitative problem.

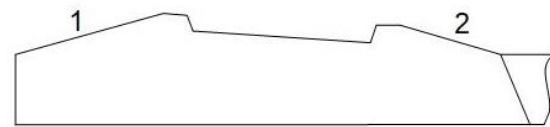


Fig. 2. Destruction areas

Concrete, like metal, belongs to solid-state solid materials, inside which both longitudinal and transverse waves propagate. The rail fastenings have constant contact with the pad, transmitted longitudinal and transverse spherical waves, which move particles as shown in Fig. 1, *a* and Fig. 1, *b* into a sleeper. Thus, it is found that the destruction areas 1 and 2 correspond to the directions of propagation of force waves, in which 92 % of the energy is spent on ensuring the movement of particles by the action of transverse waves that are, the particles tend to take the place which the underlying particles freed up by the action of longitudinal waves. Since the particles have a rigid connection with each other, with such a displacement, tension occurs between the particles, which contradicts the functional work of concrete intended for compression work.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

The wave propagation time varies depending on the characteristics of the material. For reinforced concrete sleepers, the longitudinal wave velocity of the concrete – 4000 m/s, and the shear wave velocity of 2600 m/s. Longitudinal waves perform compressive efforts in the direction of propagation and make particles to move in this direction. In parallel, two processes occur that have a different focus. In the first process, concrete particles move under the influence of transverse waves into the empty space. The second process involves the movement of concrete particles under the action of reflected longitudinal waves from the reinforcement. Therefore, the destruction of concrete at sites 1 and 2 will be absent if tensile forces under the action of the first process are timely compensated by the compressive forces of the second process.

Thus, the geometric shape of the sleepers, the location of the reinforcement and the physical and mechanical characteristics of concrete and reinforcement, as well as the relationships between them, are components of the deformability process and a change in any of the characteristics forces us to review other characteristics to ensure the safe and functional operation of the sleepers.

Example 3. Prediction based on the study of the physical nature of the accumulation of damage to wooden sleepers

Wood, as a material, refers to solid-state solid materials, but its physical and mechanical characteristics are such that only longitudinal waves propagate inside the material. Moreover, the velocities of longitudinal waves along the fibers in the perpendicular direction to the fibers and in the radial direction are different. The wood fibers in the wooden sleepers are located along the length of the sleepers, and basically, the transverse profile of the wooden sleepers is such that the load from the rail to the sleepers is transmitted in radial directions and at an angle to them. Thus, superimposing Fig. 1, *a* to the contact areas of the metal pad and sleepers, and we will consider the displacements of bound atoms or molecules of wood under the action of longitudinal waves of a certain direction to the wood fibers.

It was shown in [8] that at different speeds of movement the contact time of the rail and wheel is different, and the lower the speed, the longer the pulse transmission time. The radial velocity of lon-

gitudinal waves in a tree is approximately 700 m/s. The rate of change of momentum per unit time at a rolling stock speed of 2.7 m/s is $2.1 \cdot 10^{-5}$ kN/s, at 16.7 m/s – $3.1 \cdot 10^{-6}$ kN/s, at 33.3 m/s – $1.3 \cdot 10^{-6}$ kN/s. Consequently, when the speed of the rolling stock changed by 6 times, the change in momentum increased by 6.84 times, when the speed of the rolling stock changed by 12 times, the change in momentum increased by 15.74 times. Physically, this means that at the same speed of movement of power waves inside wooden sleepers, the intensity of the energy flow at a point is different, and its value is proportional to the change in the intensity of the pulse.

The intensity of the force fields and the duration of their action affects the interatomic bonds and the destruction of bonds between the bound atoms and molecules of wood. Destroyed wood fibers will create a layer with new physical and mechanical characteristics. The destroyed layer will act as a damper, and its thickness will depend on the intensity value of the force fields that do not lead to the destruction of wood fibers under repeated exposure cycles.

Example 4. Prediction based on the study of the physical nature of the accumulation of damage in soils

Materials such as soils belong to solid-state but bulk materials in which both longitudinal and transverse waves propagate. Saturation of soils with water significantly changes the properties of soils of a small fraction, so when dry, particles in homogeneous soils are single grains of certain fractions of the soil, and not bound atoms or molecules. In this case, the presence of transverse waves determines the amount of energy spent on overcoming the adhesion forces between the particles and friction when moving. If the soil is saturated with water, then the particles are connected atoms or molecules, the bond between which is similar to the work of solid materials.

Also, the saturation of soils with water and the size of the fraction affects the change in the local volume of soils, as a function depending on the density, temperature, and compressibility of the soil, under the action of force waves. So, there are dependencies corresponding to a specific moisture value of a certain value of the soil compaction coefficient. If the soil throughout the volume has the

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

corresponding characteristics, these soils are considered compacted and the action of force waves will not cause any physical processes to appear, the waves will pass through the soil thickness until they are completely damped. The behavior of such a layer can indeed be regarded as the behavior of an absolutely rigid body. Under other conditions, various physical processes will take place leading to a change in soil volumes. Therefore, depending on the physical and mechanical characteristics of soils at the time of mechanical action, different scenarios of soil behavior are possible.

In addition, sleepers have certain requirements for deepening into the ballast layer, this leads to the fact that the movement of soil particles occurs under the influence of several force fields, in which each field has its own clear vibration parameters and the impact results of the others. So, at the points of contact between the reinforced concrete sleepers and the ballast layer, in the latter, there are four different power processes, two of which transfer energy with the help of longitudinal waves and two with the help of transverse waves. Even with the same value of the force action from the wheel on the rail but different speeds of motion of rolling stock, the same ballast layer will have different characters and places of concentration of energy of the deformative process, as a result of the superposition of force fields in time. When changing the place of application, the value and direction of the force impact of the wheel on the rail and the same speed of motion of rolling stock, the processes of deformability in the ballast layer will differ too.

Also, if the state of the ballast layer is such that it is possible to tear off the surface of the sleepers from the ballast, in addition to these four power processes, two more processes are added that transfer energy using longitudinal and transverse waves.

In addition, if there is a vibrational effect on the ballast located in a limited box, size of which is smaller than necessary for attenuation of waves, then there are processes of reflection of force fields. These processes also contribute to changes in a local volume.

Given the above processes, when experimenting with vibrational effects on ballast, it is imperative that the results be obtained for certain:

- characteristics of the ballast layer;
- parameters of force impact (frequency of exposure and frequency of reiteration of exposure, as

well as the conditions of contact of the stamp and ballast);

- geometric characteristics of the test sample.

Therefore, there is a need to correlate the results obtained in the experiments with the results obtained under actual operating conditions. And for this, data classifications are needed to predict soil deformability over time.

Originality and practical value

It has been proposed to develop classifications of changes in the material physical properties according to the probability of irreversible deformations and the impossibility of deformations and also classifications of changes in the material mechanical properties, according to the probability of the appearance defect and changing the structure of the material.

The ability to simulate analytically any physical processes occurring inside elements due to the proposed method to allow combining the influence of mechanical and physical effects into a single calculation. That enables to assess the probability of appearing defects in elements under certain dynamic loads when railway track risk assessment over time due to railway track elements' deformability.

Conclusions

The article is devoted to the study of the deformability processes in the interaction of the railway track and rolling stock and the environmental impact, from the point of view of considering a dynamic problem that requires taking into account changes in the technical conditions of both elements and the design of the railway track.

The work takes into account that:

- the elements and design of the railway track during operation are subjected to a variety of physical and mechanical influences. Their influence is the cause of changes in the physical and mechanical properties of the materials of the elements and the bonds between the track design elements.

- the processes of deformability are determined by the second limiting state, by definition, unsuitability for normal operation, so it became necessary to have additional data on the behavior of the track design elements.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

For this purpose, it is proposed to apply the theory of elastic waves propagation and replace the model of the material as a continuum with the model of the material as a discrete substance. The changes introduced in the simulation made it possible to apply the basic law of dynamics and the first law of thermodynamics for the internal volume of the track design elements.

Based on these laws, the need is formulated to classify the parameters of the change in the sum of energies as for changes:

– physical properties of the material in terms of the probability of irreversible deformation and the impossibility of deformation;

– mechanical properties of the material in the probability of the appearance defect and changing the structure of the material.

Application of the method made it possible to show the importance of knowledge of the data on the behaviour of materials of railway track elements during operation using examples of the appearance of local damage and changes caused by the action of local processes. That will provide to expand data on changes in the material behaviour under dynamic loads when railway track risk assessment over time due to railway track elements deformability.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Баб'як М. О. Експлуатація ресурсозберігаючих контактних елементів міського електричного транспорту. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 33–38.
2. Бондаренко И. А. Концепция детализации как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2018. Вып. 106. С. 14–19.
3. Бондаренко І. О. Моделивання з метою встановлення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2016. Т. 1, № 7 (79). С. 4–10. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59874>
4. Зеленько Ю. В., Зеленько Д. М., Недужа Л. О. Вивчення негативного впливу нафтопродуктів на металеві елементи залізничної інфраструктури. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 5 (89). С. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218353>
5. Лысюк В. С., Каменский В. Б., Башкатова Л. В. *Надежность железнодорожного пути*. Москва : Транспорт, 2001. 286 с.
6. Фомін О. В., Ловська А. О., Горбунов М. І., Фоміна Ю. В. Визначення поздовжньої навантаженості несучої конструкції вагона-платформи, завантаженого контрейлером. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 4 (88). С. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213449>
7. Accattatis F. M. D., Bruner M., Crisi F., D'Ovidio G., Valente G., Vitali P. Railway vehicle dynamics and the soil vibration analysis. *Conference : 2nd International Workshop Diss_12 «Dynamic Interaction of Soil and Structure»*. 2014. P. 161–176.
8. Bondarenko I. Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. Iss. 7 (84). P. 28–36. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85464>
9. Bondarenko I., Keršys R., Lunys O., Neduzha L. Dynamic Track Irregularities Modeling when Studying Rolling Stock Dynamics. *Proc. of 23rd Intern. Sci. Conf.* (Palanga, 2-4 oct., 2019). Kaunas University of Technology. Palanga, 2019. P. 1014–1019.
10. Bondarenko I. O., Neduzha L. O. Investigation of the Influence of the Rolling Stock Dynamics on the Intensity of Using of the Railway Track Elements. *Science and Transport Progress*. 2019. № 4 (82). P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/176661>
11. Csépe R. Wheel-Rail Interface in narrow curves. *Proceedings of the 10th International Conference on Railway Bogies and Running Gears – Department of Rolling Stock of the Scientific Society of Mechanical Engineers : Conference Paper* (Budapest, 12–15 sept. 2016). Budapest, 2016. P. 297–305.
12. Ershova N., Bondarenko I., Shibko O., Velmagina N. Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. Iss. 7 (93). P. 53–63. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131534>
13. Górka W., Baginski J., Socha M., Sęćlik T., Leśniak D., Wojtas M., Flisiuk B., Michalak M. Cloud Decision Support System for Risk Management in Railway Transportation. *Proceedings of 14th International Conference on Software Technologies*. 2019. Vol. 1. P. 475–482. DOI: <https://doi.org/10.5220/0007837904750482>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

14. Kalivoda J., Neduzha L. Simulation of Safety Against Derailment Tests of an Electric Locomotive. *Engineering Mechanics 2019 : Proceedings of 25th International Conference* (Svratka, 13-16 May 2019). Svratka, 2019. P. 177–180. DOI: <https://doi.org/10.21495/71-0-177>
15. Karliński J., Ptak M., Chybowski L. Simulation-Based Methodology for Determining the Dynamic Strength of Tire Inflation Restraining Devices. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 4. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13040991>
16. Klimenko I., Kalivoda J., Neduzha L. Speed Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical. *TRANSBALTICA XI : Transportation Science and Technology*. 2020. P. 531–540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56
17. Kondratiev A., Gaidachuk V., Nabokina T., Tsaritsynskiy A. New possibilities in creating of effective composite size-stable honeycomb structures designed for space purposes. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. 2020. P. 45–59. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5
18. Lee C. S., Bourdage J. S. Risk Taking. *The Wiley Encyclopedia of Personality and Individual Differences*. 2020. P. 363–367. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118970843.ch239>
19. Rzeczycki A., Wiśnicki B. Strength Analysis of Shipping Container Floor with Gooseneck Tunnel under Heavy Cargo Load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81–90. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.252.81>
20. Skrucany T., Semanova S., Milojević S., Ašonja A. New Technologies Improving Aerodynamic Properties of Freight Vehicles. *Applied Engineering Letters : Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 4. Iss. 2. P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.18485/aeletters.2019.4.2.2>
21. Strážovca P., Gerlicia J., Lacka T., Harušinec J. Innovative solution for experimental research of phenomena resulting from the wheel and rail rolling. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 906–911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.127>
22. Tatarinova V. A., Kalivoda J., Neduzha L. O. Research of Locomotive Mechanics Behavior. *Science and Transport Progress*. 2018. № 5 (77). P. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026>
23. Trubia S., Severino A., Curto S., Arena F., Pau G. Smart Roads : An Overview of What Future Mobility Will Look Like. *Infrastructures*. 2020. Vol. 5. Iss. 12. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures5120107>
24. Tsiavos A., Mackie K. R., Vassiliou M. F., Stojadinovic B. Dynamics of inelastic base-isolated structures subjected to recorded ground motions. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 15. Iss. 4. P. 1807–1830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0022-5>
25. Wajda L., Duda-Chodak A., Tarko T., Kamiński P. Application of principal component analysis for the optimisation of lead (II) biosorption. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2017. Vol. 33. Iss. 10. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2358-7>
26. Zhuravlev A., Razevig V., Ivashov S., Skrebkov A., Alekseev V. On the Use of Microwave Holography to Detect surface Defects of Rails and Measure the Rail Profile. *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 6. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19061376>

I. O. БОНДАРЕНКО^{1*}, Л. О. НЕДУЖА^{2*}

^{1*}Каф. «Коля та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, ел. пошта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{2*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ПРОБЛЕМА ВІДСУТНОСТІ ДАНИХ ПРО ПОВЕДІНКУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ

Мета. Основна мета цієї роботи – надати теоретичне обґрунтування необхідності розширення даних про зміну поведінки матеріалів під час динамічних навантажень для оцінки ризику залізничної колії з часом унаслідок деформативності її елементів. **Методика.** Для дослідження було використано оригінальну модель конструкції залізничної колії, описану за допомогою оригінальної методики, заснованої на здатності пружних хвиль поширювати енергію силових імпульсів у просторі та часі, а також модель, що описує матеріали як дискретні речовини. **Результати.** Установлено, що властивості матеріалів впливають на деформативність

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/223526>

© I. O. Bondarenko, L. O. Neduzha, 2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

елементів та конструкцію залізничної колії; основним параметром під час вивчення процесів деформативності є час; матеріал як речовина складається з атомів і молекул, а отже, не є суцільним; внутрішні фізичні процеси визначають зміни в поведінці матеріалу елемента. **Наукова новизна.** Запропоновано розробити класифікації змін фізичних властивостей матеріалів за ймовірністю появи незворотних деформацій та неможливістю деформацій, а також класифікації змін механічних властивостей матеріалів за ймовірністю появи дефекту та зміною структури матеріалів. **Практична значимість.** Можливість аналітичного моделювання будь-яких фізичних процесів, що відбуваються всередині елементів, завдяки запропонованому методу дозволяє поєднати вплив механічних та фізичних дій в одному розрахунку. Це сприяє встановленню ймовірності появи дефектів елементів за певних динамічних навантажень для оцінки ризику залізничної колії з часом через деформативність її елементів.

Ключові слова: ризик; деформації; матеріали; дефект; деформативність; фізико-механічні характеристики

И. А. БОНДАРЕНКО^{1*}, Л. А. НЕДУЖАЯ^{2*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{2*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта lnorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ПРОБЛЕМА ОТСУТСТВИЯ ДАННЫХ О ПОВЕДЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА

Цель. Основная цель данной работы – теоретическое обоснование необходимости расширения данных об изменении поведения материалов при динамических нагрузках для оценки риска железнодорожного пути с течением времени из-за деформативности его элементов. **Методика.** Для исследования использовалась оригинальная модель конструкции железнодорожного пути, описанная с помощью оригинальной методики, основанной на способности упругих волн распространять энергию силовых импульсов в пространстве и времени, а также модели, описывающей материалы как дискретные вещества. **Результаты.** Установлено, что свойства материалов влияют на деформативность элементов и конструкцию железнодорожного пути; основным параметром при исследовании процессов деформативности является время; материал как вещество состоит из атомов и молекул и поэтому не является непрерывным; внутренние физические процессы определяют изменения в поведении материала элемента. **Научная новизна.** Предложено разработать классификации изменений физических свойств материалов по вероятности необратимых деформаций и невозможности деформаций, а также классификации изменений механических свойств материалов по вероятности появления дефекта и изменения структуры материалов. **Практическая значимость.** Возможность аналитического моделирования любых физических процессов, происходящих внутри элементов, благодаря предложенному методу позволяет объединить влияние механических и физических воздействий в единый расчет. Это способствует определению вероятности появления дефектов в элементах при определенных динамических нагрузках при оценке риска железнодорожного пути с течением времени из-за деформативности его элементов.

Ключевые слова: риск; деформации; материалы; дефект; деформативность; физико-механические характеристики

REFERENCES

1. Babyak, M. (2019). Operation of Resource-Saving Contact Elements of Urban Electric Transport. *Visnik of V. Dahl East Ukrainian National University*, 3(251), 33-38. (in Ukrainian)
2. Bondarenko, I. A. (2018). Concept of detailization as a method of increasing the competitiveness of railway transport. *Construction, material science, mechanical engineering*, 106, 14-19. (in Russian)
3. Bondarenko, I. O. (2016). Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(79)), 4-10. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59874> (in Ukrainian)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4. Zelenko, Y. V., Zelenko, D. M., & Neduzha, L. O. (2020). Study of negative influence of petroleum products on metal elements of railway infrastructure. *Science and Transport Progress*, 5(89), 103-113. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218353> (in Ukrainian)
5. Lysyuk, V. S., Kamenskiy, V. B., & Bashkatova, L. V. (2001). *Nadezhnost zheleznodorozhnogo puti*. Moscow: Transport. (in Russian)
6. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Horbunov, M. I., & Fomina, Y. V. (2020). Determination of the longitudinal load of supporting structure of the flat car loaded with a piggyback. *Science and Transport Progress*, 4(88), 103-113. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213449> (in Ukrainian)
7. Accattatis, F. M. D., Bruner, M., Crisi, F., D'Ovidio, G., Valente, G., & Vitali, P. (2014). Railway vehicle dynamics and the soil vibration analysis. *Conference: 2nd International Workshop Diss_12 «Dynamic Interaction of Soil and Structure»* (pp. 161-176). (in English)
8. Bondarenko, I. (2016). Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(84)), 28-36. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85464> (in English)
9. Bondarenko, I., Keršys, R., Lunys, O., & Neduzha, L. (2019). Dynamic Track Irregularities Modeling when Studying Rolling Stock Dynamics. In *Proceedings of 23rd International Scientific Conference* (pp. 1014-1019). Palanga. (in English)
10. Bondarenko, I. O., & Neduzha, L. O. (2019). Investigation of the Influence of the Rolling Stock Dynamics on the Intensity of Using of the Railway Track Elements. *Science and Transport Progress*, 4(82), 61-73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/176661> (in English)
11. Csépké, R. (2016). Wheel-Rail Interface in narrow curves. *Proceedings of the 10th International Conference on Railway Bogies and Running Gears-Department of Rolling Stock of the Scientific Society of Mechanical Engineers: Conference Paper* (pp. 297-305). Budapest, Hungary. (in English)
12. Erhova, N., Bondarenko, I., Shibko, O., & Velmagina, N. (2018). Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(93)), 53-63. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131534> (in English)
13. Górka, W., Bagiński, J., Socha, M., Steclik, T., Leśniak, D., Wojtas, M., ... Michalak, M. (2019). Cloud Decision Support System for Risk Management in Railway Transportation. *Proceedings of the 14th International Conference on Software Technologies*, 1, 475-482. DOI: <https://doi.org/10.5220/0007837904750482> (in English)
14. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2019). Simulation of Safety Against Derailment Tests of an Electric Locomotive. *Engineering Mechanics 2019: Proc. of 25th Intern. Con Proceedings of 25th International Conference* (pp. 177-180). DOI: <https://doi.org/10.21495/71-0-177> (in English)
15. Karliński, J., Ptak, M., & Chybowski, L. (2020). Simulation-Based Methodology for Determining the Dynamic Strength of Tire Inflation Restraining Devices. *Energies*, 13(4), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13040991> (in English)
16. Klimenko, I., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2020). Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed. In *TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology* (pp. 531–540). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56 (in English)
17. Kondratiev, A., Gaidachuk, V., Nabokina, T., & Tsaritsynskyi, A. (2020). New possibilities in creating of effective composite size-stable honeycomb structures designed for space purposes. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* (pp. 45–59). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5 (in English)
18. Lee, C. S., & Bourdage, J. S. (2020). Risk Taking. *The Wiley Encyclopedia of Personality and Individual Differences* (pp. 363-367). DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118970843.ch239> (in English)
19. Rzczycki, A., & Wiśnicki, B. (2016). Strength Analysis of Shipping Container Floor with Gooseneck Tunnel under Heavy Cargo Load. *Solid State Phenomena*, 252, 81-90. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.252.81> (in English)
20. Skrucany, T., Semanova, S., Milojević, S., & Ašonja, A. (2019). New Technologies Improving Aerodynamic Properties of Freight Vehicles. *Applied Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(2), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.18485/aeletters.2019.4.2.2> (in English)
21. Strážovec, P., Gerlici, J., Lack, T., & Harušinec, J. (2019). Innovative solution for experimental research of phenomena resulting from the wheel and rail rolling. *Transportation Research Procedia*, 40, 906-911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.127> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

22. Tatarinova, V. A., Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2018). Research of Locomotive Mechanics Behavior. *Science and Transport Progress*, 5(77), 104-114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026> (in English)
23. Trubia, S., Severino, A., Curto, S., Arena, F., & Pau, G. (2020). Smart Roads: An Overview of What Future Mobility Will Look Like. *Infrastructures*, 5(12), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures5120107> (in English)
24. Tsiavos, A., Mackie, K. R., Vassiliou, M. F., & Stojadinović, B. (2016). Dynamics of inelastic base-isolated structures subjected to recorded ground motions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(4), 1807-1830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0022-5> (in English)
25. Wajda, L., Duda-Chodak, A., Tarko, T., & Kamiński, P. (2017). Application of principal component analysis for the optimisation of lead (II) biosorption. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(10), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2358-7> (in English)
26. Zhuravlev, A., Razevig, V., Ivashov, S., Skrebkov, A., & Alekseev, V. (2019). On the Use of Microwave Holography to Detect surface Defects of Rails and Measure the Rail Profile. *Sensors*, 19(6), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19061376> (in English)

Received: August 10, 2020

Accepted: December 11, 2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.015

Є. В. ГОРОБЕЦЬ^{1*}

^{1*}ТОВ НВП «Укртранскад», бульв. Зоряний, буд. 1, корп. 1, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 787 03 38, ел. пошта gorobets.eugene@gmail.com, ORCID 0000-0001-8017-1595

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗНОСУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ ПРОМИСЛОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ПІД ВПЛИВОМ КОРОЗІЇ МАТЕРІАЛУ

Мета. Дослідження спрямовано на отримання нових знань про вплив навколишнього середовища на несучі конструкції тягового рухомого складу залізниць за параметром корозійного зносу, характер динаміки цього впливу, а також оцінку технічного стану вітчизняного тягового рухомого складу промислових залізниць. **Методика.** Для отримання релевантних даних автор провів агрегацію та аналіз результатів ультразвукової товщинометрії основних несучих конструкцій локомотивів, виявлених протягом восьми років під час виконання робіт із подовження строку служби локомотивів промислового транспорту. Несучі конструкції серій локомотивів, які взято для цього дослідження, мають загальний діапазон строків експлуатації 25–48 років, а самі одиниці територіально перебувають у різних областях України. **Результати.** Автор виявив, що серед дослідженого парку тепловозів промислового транспорту рівень рівномірної корозії має лінійну залежність від строку його експлуатації з достатньо низьким кутовим коефіцієнтом. Таким чином, відповідно до визначень нормативної документації, що була актуальною на момент виробництва одиниць рухомого складу, які є об'єктами цього дослідження, матеріал несучих конструкцій (окрім одного граничного випадку) належить до стійкої групи корозійної стійкості металу. **Наукова новизна.** Через незалежність промислового рухомого складу від державних залізничних підприємств та виконання робіт із технічного обслуговування різними організаціями інформація про його загальний стан не є легкодоступною. Автор уперше зібрав статистичні дані щодо стану несучих конструкцій промислового рухомого складу та провів їх аналіз. **Практична значимість.** Отримані результати ілюструють динаміку розвитку рівномірної корозії конструкцій тягового рухомого складу промислового залізничного транспорту. Ця інформація, у свою чергу, дає підґрунтя для подальшого вдосконалення методики обстеження одиниць рухомого складу як у ході планових робіт, так і з метою подовження строку служби.

Ключові слова: залізничний транспорт; промисловий транспорт; тяговий рухомий склад (ТРС); корозія; витривалість

Вступ

Головною вимогою до будь-яких механізмів або систем є безпечність їх функціонування. Для рухомого складу (РС) залізничного транспорту рівень безпеки закладають на стадіях проектування та модернізації його окремої моделі та підтримують заходами технічного обслуговування тих одиниць, які функціонують.

В Україні на цей час склалися умови, що призводять до послаблення контролю за станом

РС. Робота на лініях неврахованої кількості одиниць РС приватної власності, а також відсутність наукової підтримки під час проведення робіт із ремонту та відновлення транспортних одиниць викликають нерозуміння динаміки зносу парку РС. Відсутність такої інформації унеможливорює розробку, розвиток та впровадження довгострокових заходів щодо технічної підтримки РС, що призведе до додаткових матеріальних затрат.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Одним з основних факторів погіршення технічного стану РС є корозія матеріалу несучих конструкцій. На залізниці корозія безпосередньо впливає на економічні витрати через необхідність проведення ремонтних робіт. Проте її опосередкований вплив може бути значнішим: матеріальні та людські втрати від аварійних ситуацій, економічні втрати у зв'язку з негативними змінами в логістичних процесах. Таким чином, попередження наслідків корозії порівняно з їх усуненням є пріоритетним рішенням проблеми. Цій темі присвячені дослідження як у сфері залізничної [2, 4, 6] і нафтогазової галузі [3], так і загальні теоретичні дослідження [1, 7, 10] та систематизовані теоретичні посібники [8, 9].

Мета

Основною метою цього дослідження є встановлення чисельних показників динаміки зносу одиниць рухомого складу залізниць за критерієм корозійного ураження та обґрунтування зменшення обсягів робіт під час їх обстеження. Також отримані дані дають змогу перевірити положення про лінійний знос металевих конструкцій. Оскільки об'єкти досліджень перебувають у різних агресивних умовах навколишнього середовища (умови гірничозбагачувальних комбінатів, заводів металевих виробів, виробництв харчових продуктів, портів тощо), у даних будуть з'являтися викиди, що повинні групуватись за одиницями локомотивів, а локомотиви, у свою чергу, групуються за умовами навколишнього середовища (тобто за типом діяльності виробництва, на базі якого працюють ці одиниці РС).

Методика

Статистичні дані для аналізу було отримано в ході виконання робіт з обстеження технічного стану несучих конструкцій (НК) локомотивів промислового транспорту силами Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ) [10]. Після сортування даних за моделями для дослідження було обрано серії локомотивів ТЕМ2 та ТГМ4 разом із модифікацією ТГМ4А (далі ТГМ4, якщо не зазначено конкретно, якої саме модифікації стосується інформа-

ція), як найбільш доступні вибірки за об'ємом – 27 та 37 одиниць відповідно. Таким чином, об'єм вибірок візків тепловозів ТЕМ2 складає 54, а тепловозів ТГМ4 – 74 одиниці.

Розміри товщин рам кузовів та рам візків локомотивів було отримано згідно з розробленими в ДНУЗТ методиками обстеження. Значення товщини балок в окремому перерізі було заміряно не менш як три рази, а фактичний розмір товщини, згідно з методикою, за відсутності різких коливань показника, обрано як середній з усіх отриманих значень.

Рис. 1 ілюструє розташування точок на перерізах несучих конструкцій тепловоз ТЕМ2.

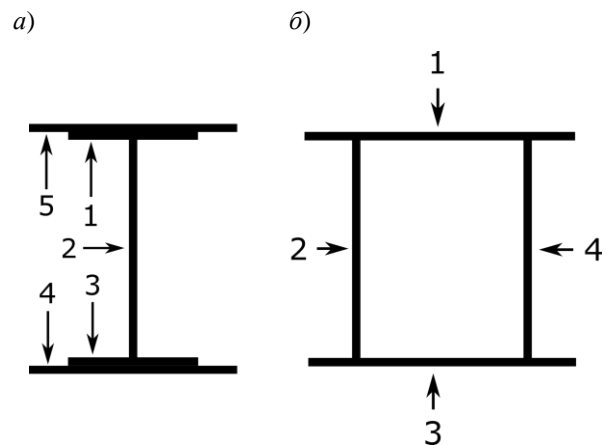


Рис. 1. Переріз НК тепловоза ТЕМ2:
а – кузов; б – візок

Fig. 1. Section of supporting structure of TEM2 locomotive:
a – body; b – bogie

На цільовому перерізі поздовжньої балки кузова тепловоза ТЕМ2 (рис. 1, а) у точці 1 товщиноміром заміряють товщину металу стінки, у точках 4 та 5 – товщину металу бронеліста. У точках 1 та 3 вимірюють товщину металу полицок. Оскільки разом із бронелістом двотавр не складає суцільну структуру, ультразвукова хвиля відбивається від суміжних із бронелістами граней полицок балки. Таким чином, товщини в точках 1 та 3 ніяк не пов'язані з товщинами в точках 4 та 5. На перерізі візка (рис. 1, б) заміряють товщини металу стінок (т. 1, 3) і полицок (т. 2 та 4).

Перерізи несучих конструкцій візка та кузова тепловоза ТГМ4 з позначеннями точок обстеження наведені на рис. 2.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

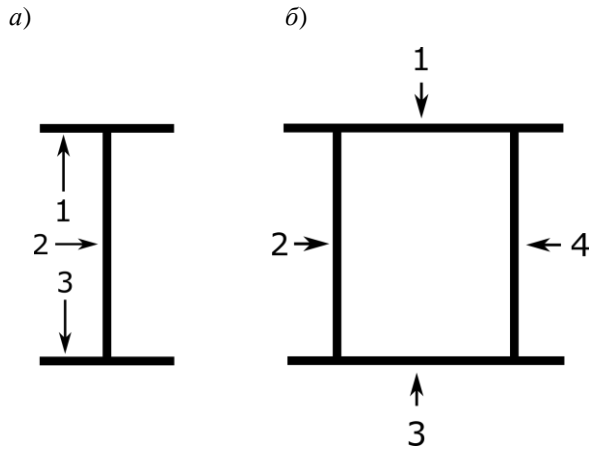


Рис. 2. Переріз НК тепловоза ТГМ4:
а – кузов; б – візок

Fig. 2. Section of supporting structure of TGM4 locomotive:
a – body; b – bogie

Тепловоз ТГМ4 відрізняється від тепловоза ТЕМ2 відсутністю бронелистів на рамі кузова, тому кількість точок вимірювань на цьому перерізі складає не п'ять, а три.

Наочним відображенням результатів дослідження є розташування отриманих даних на точкових діаграмах залежності товщини балок несучих конструкцій тягового рухомого складу (ТРС) промислових залізниць від часу. Для обробки отримані дані було розділено за моделями ТРС, а також за видом несучої конструкції (кузов або візки), у яких було проведено заміри. За нульову точку відліку товщин НК узято проектні значення.

Після побудування точкової діаграми проведено побудову лінії тренду, яка відображає тенденцію зміни цільових показників.

Результати

Аналіз даних показав, що середнє зменшення товщини НК обраних локомотивів унаслідок рівномірної корозії варіюється в межах 0,03–0,1 мм/рік.

У кожному перерізі окремого виду НК моделей ТРС хмари точок мають приблизно однакову форму й відрізняються тільки положенням цієї хмари на осі ординат. Тому через значний обсяг джерел даних ілюструвати будемо тільки

дані перших точок кожного виду НК, які відображають типову динаміку корозії в перерізі.

Також у перерізах кузовів тепловозів ТЕМ2 було виявлено одиничні викиди, які наочно значно відрізнялися від відповідних основних груп отриманих значень, а також групи викидів та незвичні стрибки значень у кузовах тепловозів ТГМ4. Аналіз за критерієм Граббса показав, що вилучені значення в даних кузовів тепловозів ТЕМ2 були викидами навіть за рівня довіри $\alpha = 0,005$, хоча для проведення перевірки отриманих даних на викид рівень довіри було взято на рівні $\alpha = 0,05$. У випадку тепловозів ТГМ4 після усунення аномалій в отриманих даних було проведено повторний аналіз даних та вилучення викидів на попередньо визначених умовах.

Початкові дані щодо зношування верхньої полицки рами кузова тепловоза ТЕМ2 (точка 1 на рис. 1, а) наведено на рис. 3. Горизонтальна вісь – час у роках, а вертикальна вісь – товщина несучої конструкції, що виражена у міліметрах.

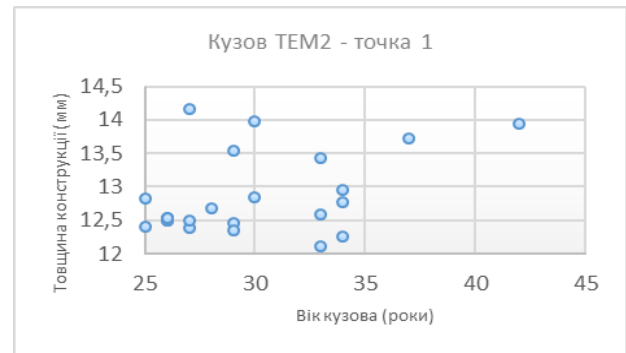


Рис. 3. Початкові дані товщин верхніх полицок рами кузова тепловоза ТЕМ2

Fig. 3. Initial thicknesses data of the top shelves of the body frame of TEM2 locomotive

Звертаємо увагу, що для збільшення корисної площини діаграми з метою поліпшення сприйняття даних переріз осей координат у діаграмах початкових даних не збігається з початком координат, а також розмірність.

На рис. 4 побудовано тренд розвитку корозії в цій точці.

За формою хмари значень та залежністю товщини металу від віку НК описують формулами лінійного тренду, що зазначені в табл. 1.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

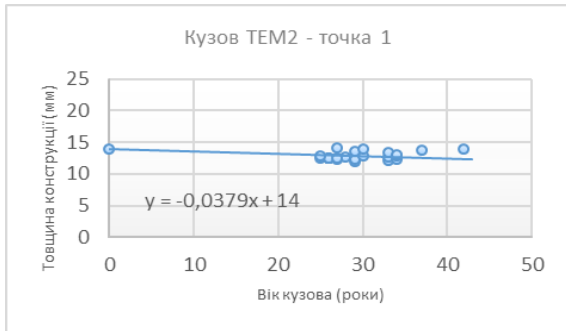


Рис.4. Тренд розвитку корозії точки 1 на рамі кузова тепловоза TEM2

Fig.4. Corrosion trend of the point 1 on the body frame of TEM2 locomotive

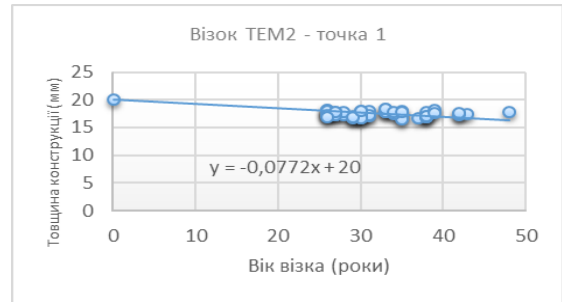


Рис. 6. Тренд розвитку корозії точки 1 на рамі візка тепловоза TEM2

Fig. 6. Trend of corrosion point 1 on the bogie frame of TEM2 locomotive

Формули трендів корозії візків тепловоза TEM2 наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Тренди корозії рами кузова тепловоза TEM2

Table 1

Corrosion trends of the body frame of TEM2 locomotive

Точка	Формула тренду
1	$y = 14 - 0,0379 * x$
2	$y = 10 - 0,0481 * x$
3	$y = 14 - 0,0344 * x$
4	$y = 24 - 0,0823 * x$
5	$y = 24 - 0,0818 * x$

На рис. 5 та 6 відображено дані з верхньої полицки візка тепловоза TEM2 та отриманий тренд розвитку корозії відповідно.

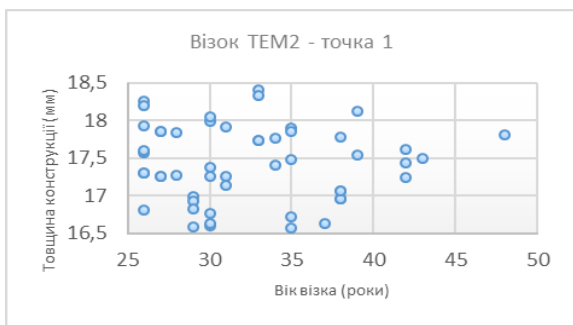


Рис. 5. Початкові дані з верхньої полицки рами візка тепловоза TEM2

Fig. 5. Initial data from the upper shelf of the bogie frame of TEM2 locomotive

Таблиця 2

Тренди корозії візків тепловоза TEM2

Table 2

Corrosion trends of TEM2 locomotive bogies

Точка	Формула тренду
1	$y = 20 - 0,0772 * x$
2	$y = 16 - 0,0657 * x$
3	$y = 32 - 0,0778 * x$
4	$y = 16 - 0,0650 * x$

Дані, отримані з моделі ТГМ4 та модифікацій ТГМ4А та ТГМ4Б, відрізняються розкидом значень та формою хмар точок. Товщини кузова виділяються різким стрибком значень на межі 25–26 років (рис. 7).

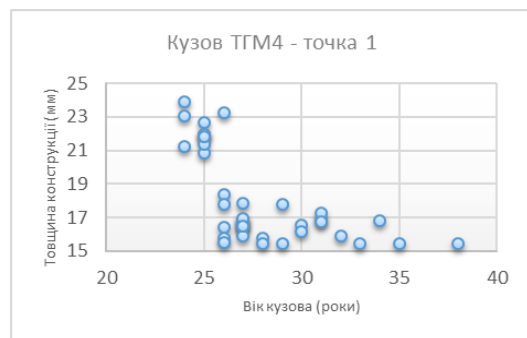


Рис. 7. Початкові дані щодо верхньої полицки рами кузова тепловоза ТГМ4

Fig. 7. Initial data on the upper shelf of the body frame of TGM4 locomotive

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Неприродний стрибок отриманих значень на межі 25–26 років пояснюється використанням іншого профілю в певній групі локомотивів. Усі одинадцять локомотивів, які потрапили в діапазон значень 20–24 мм, належать до модифікації ТГМ4Б. Оскільки ця модифікація представляє вузьку групу локомотивів віком 24–25 років, відповідні дані було вилучено та в обробці не задіяно. Побудований тренд наведено на рис. 8.



Рис. 8. Тренд розвитку корозії точки 1 на рамі кузова тепловоза ТГМ4

Fig. 8. Corrosion development trend of the point 1 on the body frame of TGM4 locomotive

Формули трендів усіх точок перерізів рам кузовів тепловозів ТГМ4 наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Тренди корозії рами кузова тепловозів ТГМ4

Table 3

Corrosion trends of body frame of TGM4 locomotives

Точка	Формула тренду
1	$y = 18 - 0,0554 \cdot x$
2	$y = 14 - 0,0687 \cdot x$
3	$y = 18 - 0,0532 \cdot x$

Початкові дані товщин верхньої полицки рам візків тепловозів ТГМ4 подано на рис. 9.

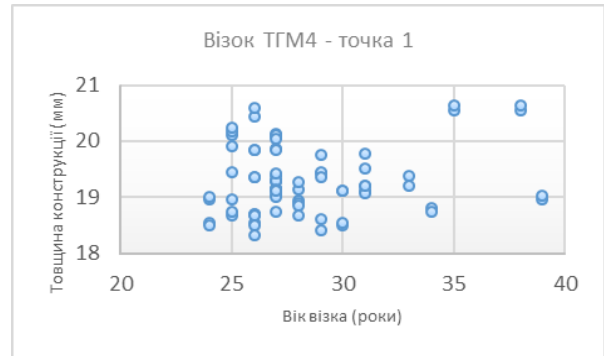


Рис. 9. Дані точки 1 на рамі візка тепловоза ТГМ4

Fig. 9. Data of the point 1 on the bogie frame of TGM4 locomotive

Тренд наведений на рис. 10.

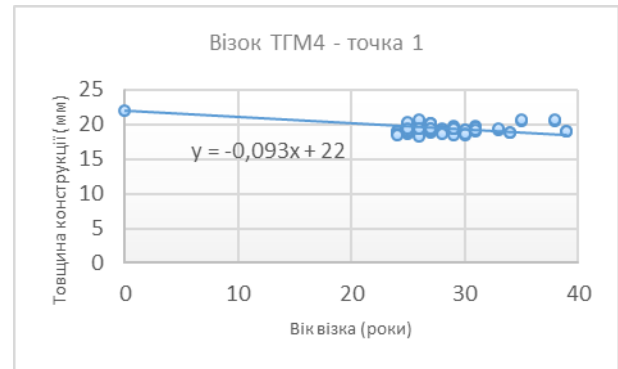


Рис. 10. Тренд даних точки 1 на рамі візка тепловоза ТГМ4

Fig. 10. Data trend of the point 1 on the bogie frame of TGM4 locomotive

Формули трендів корозії металу рами візка подано в табл. 4.

Таблиця 4

Тренди корозії візків тепловозів ТГМ4

Table 4

Corrosion trends of TGM4 locomotives

Точка	Формула тренду
1	$y = 22 - 0,0920 \cdot x$
2	$y = 18 - 0,0858 \cdot x$
3	$y = 32 - 0,1037 \cdot x$
4	$y = 18 - 0,0857 \cdot x$

З отриманих формул трендів видно, що в рамах кузовів стінки двотавра більш схильні до корозії, ніж полицки. Верхні та нижні поли-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

чки мають майже ідентичну швидкість корозії, проте значення від'ємного коефіцієнта для верхніх полицок в обох моделях тепловозів трохи більше, ніж для нижніх. У разі наявності бронелистів у конструкції рам кузовів вони також є осередком підвищеної корозії.

Для балок візків коробчастого типу обох моделей тепловозів характерна перевага швидкості розвитку корозії металу полицок над швидкістю розвитку корозії металу стінок. При цьому нижні полицки втрачають товщину металу швидше, ніж верхні.

Наукова новизна та практична значимість

Проведено аналіз фактичного стану обстеженого парку ТРС промислового транспорту за показником корозії матеріалу та виявлено динаміку розвитку корозійних процесів у несучих конструкціях. З'ясовано, що кліматичні та різні виробничі умови не впливають значним чином на процес зношування конструкцій. Підтверджено, що тренд процесу зменшення товщини несучих конструкцій має лінійну форму. Також встановлено, що у візках тепловозів найбільш схильними до впливу корозії елементами є полицки рам. У рамах кузовів незалежно від конструкції загальною рисою корозії є переважання швидкості зменшення товщини стінок над швидкістю зменшення товщини полицок. Проте в конструкції рам кузовів із бронелистами верхні та нижні бронелисти за швидкістю зменшення товщини будуть значно випереджати інші точки рами.

Висновки

Зведення даних з обстеження парку локомотивів промислового транспорту дають підстави для таких висновків:

- рівень рівномірної корозії основних несучих конструкцій тепловозів промислового транспорту має слабку залежність від строку їх експлуатації, тобто матеріал конструкцій є достатньо стійким до корозії;

- середнє зменшення товщини НК локомотивів унаслідок рівномірної корозії варіюється в межах 0,03–0,1 мм/рік;

- на підставі рівня рівномірної корозії нижніх полицок можна прогнозувати стан корозії інших елементів екіпажної частини ТРС;

- зменшити обсяг вимірювань товщини НК можна таким чином:

- 1) перевірити рівень рівномірної корозії нижніх полицок рам візків;

- 2) у випадку їх незначної (до 10 % номінальної товщини) корозії провести вибірковий контроль інших точок за протоколами візуального огляду локомотива, але в разі виявлення хоча б однієї точки з великим рівнем (>30 % номінальної товщини) корозії провести перевірку рівнів корозії у всіх рекомендованих протоколами обстеження технічного стану точках;

- 3) у випадку суттєвої корозії (>30 % номінальної товщини) провести перевірку рівнів корозії у всіх рекомендованих протоколами обстеження технічного стану точках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии. *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2. С. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87>
2. Кочергин В. В., Буханцев А. А., Панкратова И. Г., Русанов О. А. Опыт обеспечения прочности несущих конструкций локомотивов и моторвагонного подвижного состава. *Вестник ВНИИЖТ*. 2019. Т. 78, № 2. С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-67-73>
3. Кузьмин Д. А., Андреевкова А. В. Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15, № 5. С. 384–391. DOI: <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391>
4. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Павленко Ю. С., Сергієнко М. О. Аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2018. № 45 (1321). С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.06>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. *Методика оцнки остаточного ресурса несущих конструкций тягового подвижного состава*. Киев : Гос. администрация ж. д. транспорта Украины, ДИИТ, 1998. 51 с.
6. Мямлін С. В., Рейдемейстер О. Г., Пуларія А. Л., Калашник В. О. Обґрунтування продовження терміну служби пасажирських вагонів із осередками корозії хребтової балки. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55337>
7. Філатов Г. В. *Математичне моделювання процесів корозійного руйнування під напруженням* : навч. посібник. Дніпропетровськ : УДХТУ, 2002. 208 с.
8. Markus P. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. CRC Press, 2011. 941 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11020>
9. Revie R. *Uhlig's Corrosion Handbook, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 1253 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470872864>
10. Zhang F., Ju P., Pan M., Zhang D., Huang Y., Li G., Li X. Self-healing mechanisms in smart protective coatings : A review. *Corrosion Science*. 2018. Vol. 144. P. 74–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.005>

Е. В. ГОРОБЕЦ^{1*}

^{1*}ООО НПП «Укртрансакад», бульв. Звездный, д. 1, корп. 1, Днипро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 787 03 38, эл. почта gorobets.eugene@gmail.com, ORCID 0000-0001-8017-1595

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗНОСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВЗОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПОД ВЛИЯНИЕМ КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛА

Цель. Исследование направлено на получение новых знаний о влиянии окружающей среды на несущие конструкции тягового подвижного состава железных дорог по параметру коррозионного износа, характер динамики этого влияния, а также оценку технического состояния отечественного тягового подвижного состава промышленных железных дорог. **Методика.** Для получения релевантных данных автор провел агрегацию и анализ результатов ультразвуковой толщинометрии основных несущих конструкций локомотивов, выявленных в течении восьми лет во время выполнения работ по продлению срока службы локомотивов промышленного транспорта. Несущие конструкции серий локомотивов, представленных в данном исследовании, имеют общий диапазон сроков эксплуатации 25–48 лет, а сами единицы территориально находятся в разных областях Украины. **Результаты.** Автор обнаружил, что среди обследованного парка тепловозов промышленного транспорта уровень равномерной коррозии имеет линейную зависимость от срока его эксплуатации с достаточно низким угловым коэффициентом. Таким образом, согласно определениям нормативной документации, которая была актуальна на момент производства единиц подвижного состава, являющихся объектами данного исследования, материал несущих конструкций (кроме одного граничного случая) относится к стойкой группе коррозионной стойкости металла. **Научная новизна.** Из-за независимости промышленного подвижного состава от государственных железнодорожных предприятий и выполнения работ по техническому обслуживанию разными организациями информация о его общем состоянии не является легкодоступной. Автор впервые собрал статистические данные касательно состояния несущих конструкций промышленного подвижного состава и провел их анализ. **Практическая значимость.** Полученные результаты иллюстрируют динамику развития равномерной коррозии конструкций тягового подвижного состава промышленного железнодорожного транспорта. Эта информация, в свою очередь, дает основания для последующего усовершенствования методики обследования единиц подвижного состава как в ходе плановых работ, так и с целью продления срока службы.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; промышленный транспорт; тяговый подвижной состав (ТПС); коррозия; выносливость

Y. V. HOROBETS^{1*}

^{1*}LLC Scientific and Production Enterprise «Ukrtransakad», Zoriani Boulevard, bld. 1, block 1, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 787 03 38, e-mail gorobets.eugene@gmail.com, ORCID 0000-0001-8017-1595

WEAR DYNAMICS ANALYSIS OF THE SUPPORTING STRUCTURES OF SHUNTING LOCOMOTIVES OF INDUSTRIAL RAILWAY TRANSPORT UNDER THE INFLUENCE OF MATERIAL CORROSION

Purpose. The research is aimed at obtaining new knowledge about the environmental influence on the supporting structures of the traction rolling stock of railways according to the corrosive wear parameter, the nature of the dynamics of this influence, as well as the evaluation of technical condition of the domestic traction rolling stock of industrial railways. **Methodology.** To obtain the relevant data, the author conducted aggregation and analysis of the results of ultrasonic thickness measurement of the main supporting structures of locomotives, obtained during eight years of the work to extend the service life of industrial transport locomotives. The supporting structures of series of locomotives presented in this study have a total range of service life of 25-48 years. They are located in different regions of Ukraine. **Findings.** The author found that among the surveyed fleet of diesel locomotives of industrial transport, the uniform corrosion level of supporting structures has a linear dependence on their service life with a rather low slope. Thus, according to the definitions of the normative documentation, which was relevant at the time of production of the rolling stock units that are the objects of this study, the material of the supporting structures (except for one particular case) belongs to the resistant group of metal corrosion resistance. **Originality.** Due to reasons such as the independence of industrial rolling stock from state-owned railway enterprises and the performance of maintenance work by various organizations, information on the general condition of the rolling stock of industrial transport is not readily available. The author for the first time collected statistical data on the state of industrial rolling stock and analyzed them. **Practical value.** The obtained results illustrate the development dynamics of equal corrosion of traction industrial transport structures, which, in turn, gives grounds for the subsequent improvement of the methodology of examining rolling stock units both during scheduled work and in order to extend the service life.

Keywords: railway transport; industrial transport; traction rolling stock; corrosion; endurance

REFERENCES

1. Kablov, E. N., Startsev, O. V., & Medvedev, I. M. (2015). Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviation Materials and Technologies*, 2, 76-87. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87> (in Russian)
2. Kochergin, V. V., Bukhantsev, A. A., Pankratova, I. G., & Rusanov, O. A. (2019). Experience in ensuring the strength of the supporting structures of locomotives and electric multiple units. *VNIIZHT Scientific Journal*, 78(2), 67-73. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-67-73> (in Russian)
3. Kuzmin, D. A., & Andreenkova, A. V. (2019). The research of the stress-strain state with local thinning in pipelines and determination of allowable values of concentration stress and strain. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 384-391. DOI: <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391> (in Russian)
4. Martynov, I., Trufanova, A., Pavlenko, Y., & Serhiienko, M. (2018). Analysis of the technical condition of passenger wagons. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*, 45(1321), 41-46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.06> (in Ukrainian)
5. *Metodika otsenki ostatochnogo resursa nesushchikh konstruktivnykh tyagovogo podvizhnogo sostava*. Kiev: Gosudarstvennaya administratsiya zheleznodorozhnogo transporta Ukrainy, DIIT. (in Russian)
6. Myamlin, S. V., Reidemeister, O. H., Pulariia, A. L., & Kalashnyk, V. O. (2015). The rationale for extending the services of passenger cars with pockets of corrosion in the center sill. *Science and Transport Progress*, 5(59), 132-140. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55337> (in Ukrainian)
7. Filatov, H. V. (2002). *Matematychni modelyuvannya protsesiv korozivnoho ruynuvannya pid napruzhennyam: navcha'nyy posibnyk*. Dnipropetrovsk: UDKhTU. (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Marcus, P. (2011). *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. CRC Press.
DOI: <https://doi.org/10.1201/b11020> (in English)
9. Revie R. (2011). *Uhlig's Corrosion Handbook, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470872864> (in English)
10. Zhang, F., Ju, P., Pan, M., Zhang, D., Huang, Y., Li, G., & Li, X. (2018). Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science*, 144, 74–88.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.005> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.08.2020

Прийнята до друку: 09.12.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.65.027.2:[625.1.03:519.87]

А. О. ШВЕЦЬ^{1*}

^{1*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ВПЛИВ НА ДИНАМІКУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ПОПЕРЕЧНОГО ЗМІЩЕННЯ ВІЗКІВ

Мета. Робота спрямована на визначення впливу поперечного зміщення візка вантажного вагона з урахуванням величини швидкості руху на його основні динамічні показники та показники взаємодії рухомого складу з колією. **Методика.** Кількісну оцінку динамічних показників отримано методом математичного та комп'ютерного моделювання. Розрахункова схема враховує особливості взаємодії вагонів у складі поїзда: можливість прояву всіх форм коливань кузова в просторі, передачу поздовжньої сили у вертикальному та горизонтальному напрямках від сусідніх вагонів, облік технічного стану окремих частин вагона та їх конструктивних особливостей, а також різноманітні умови експлуатації. **Результати.** У процесі дослідження застосовано математичну модель зчепу з п'яти вантажних вагонів для вивчення динамічної навантаженості піввагона та колії. Проведено оцінку основних динамічних показників та показників взаємодії рухомого складу з колією у випадку поперечного зміщення візка під час руху по криволінійних ділянках залізничної колії. Обґрунтовано максимально можливі величини поперечного зміщення візка вантажного вагона. **Наукова новизна.** Доопрацьовано математичну модель зчепу вантажних вагонів у складі поїзда. У розрахункових схемах, що описують коливання, враховано особливості візків вантажних вагонів – забігання бокових рам. Модель дозволяє дослідити вплив зміни кута повороту центральної осі кузова вагона, що у свою чергу призводить до поперечного зміщення візків відносно один одного, на основні динамічні показники та показники взаємодії рухомого складу з колією. Уперше досліджено вплив поперечного зміщення візка з урахуванням зносів його деталей та вузлів під час руху на ділянках колії з нерівностями. **Практична значимість.** Результати розрахунків можна застосовувати під час оцінювання впливу поперечного зміщення візка на динамічні якості рухомого складу та показники взаємодії рухомого складу з колією з урахуванням зносів деталей та вузлів візка в разі руху в прямих і криволінійних ділянках колії з нерівностями. Застосування отриманих результатів сприятиме підвищенню стійкості вантажного рухомого складу в умовах підвищення швидкостей руху, що у свою чергу дозволить розробити технічні умови для реалізації ресурсозбережних технологій транспортування вантажів, які відповідають вимогам безпеки руху поїздів.

Ключові слова: безпека руху; динамічні показники; зміщення візків; піввагон; швидкість руху

Вступ

Безпека руху є неухильною вимогою до роботи залізничного транспорту. Значимість питань забезпечення безпеки руху зростає в умовах збільшення швидкостей руху поїздів, що впроваджують зараз в Україні [17]. Особливо важливим при цьому є визначення допустимих швидкостей руху, що пов'язано з оцінкою динамічних якостей рухомого складу. Таку оцінку здійснюють під час проведення приймальних випробувань, зокрема ходових динамічних і по впливу на колію. Замінити частину натурних випробувань комп'ютерним моделюванням неможливо, оскільки зменшення їх обсягу загрожує зменшенням вимог до безпеки руху та яко-

сті динамічних показників рухомого складу [2, 9, 16].

Математична модель рухомого складу є певною ідеалізацією реальної системи, деякі параметри якої недостатньо добре відомі. Під час випробувань нової конструкції рухомого складу можуть проявитися ті особливості, які не було враховано в математичній моделі. Експериментальні дослідження, хоча і є в достатній мірі надійними, але потребують значних коштів, тривалого часу й не здатні охопити всі ситуації, які можуть виникнути в експлуатації [19–21].

Теоретичні та експериментальні дослідження потрібно виконувати спільно. Експериментальні дослідження мають давати можливість

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

уточнити основні положення та гіпотези, розрахункові схеми, а в разі необхідності виправити результати теоретичних досліджень та виконати необхідні перерахунки [2, 7, 12].

Взаємодію рухомого складу та верхньої будови колії визначають за такими факторами: наявність ухилів та кривих ділянок колії; вага, довжина та швидкість руху поїздів; потужність локомотивів. Але найбільші горизонтальні поперечні зусилля сприймають колеса від рейок саме на криволінійних ділянках колії. Ці зусилля, особливо в крутих кривих, можуть у декілька разів перевищувати зусилля, які виникають під час виляння екіпажа на прямих ділянках. До того ж у кривих із радіусом менше 800–600 м гребені деяких коліс під час руху притиснуті до зовнішньої рейки майже на всій довжині кривої. Основними зонами виходу з ладу рейок за дефектами контактно-втомного походження є криві ділянки. Переважна кількість аварій та катастроф поїздів, зумовлених недоліками міцності конструкцій колії, рухомого складу та втратою їх стійкості, відбувається також на кривих ділянках [8, 15, 22].

Загальновідомо, що втрату стійкості або сходження рухомого складу з рейок можна поділити на два види: вкочування колеса на зовнішню рейку та провал колісної пари (колеса) всередину колії за рахунок її розпирання. Різновидом сходження через вкочування колеса на

рейку є сходження через неприпустимий поперечний угон (зсув) рейко-шпальної решітки (кут у плані) [9, 18].

Вкочування гребеня колеса на головку рейки або вістряка з подальшим провалом іншого колеса всередину колії найбільш імовірно в порожніх вагонах у кривих та навіть прямих ділянках колії, коли вагон витискається під час гальмування поїзда вгору й одночасно встановлюється в «ялинку» під дією набігаючих незагальмованих вагонів. Поперечна сила, яка при цьому виникає, притискає гребінь колеса до зношеної бокової грані головки рейки, а за наявності навіть незначного повороту рейки гребінь колеса по похилій площині бокової грані вкочується спочатку на головку рейки, а через кілька метрів зістрибує з рейки на шпалу і далі на баластну призму [10, 13, 23].

За розташування вагонів під кутом один до одного в плані (в «ялинку») виникають поперечні горизонтальні складові поздовжніх сил, а за різниці висот їх автозчеплень – вертикальні складові, які створюють додаткове довантаження або розвантаження відповідних коліс екіпажа (рис. 1, *a*). Це впливає на величини бокових та вертикальних сил взаємодії, що визначають необхідні умови вкочування коліс на головку рейки. Різниця у висоті між поздовжніми осями автозчеплень у вантажному поїзді допускається не більше 80 мм (рис. 1, *b*) [1, 12, 13].

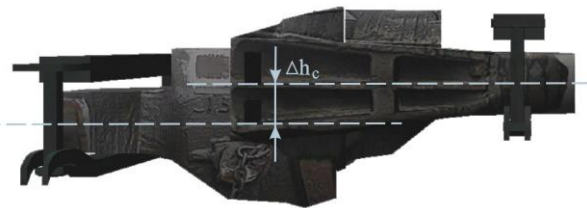
a – a*b – b*

Рис. 1. З'єднання двох вагонів:

a – група частково завантажених або порожніх вагонів у хвості поїзда;*b* – різниця рівнів осей автозчеплень

Fig. 1. Coupling of two cars:

a – a group of partially loaded or empty cars in the train tail;*b* – difference between the axle levels of the of the automatic couplers

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Сходження через вкочування колеса на рейку може трапитися в навантаженого вагона з рухомим вантажем за умови, якщо поїзд іде на вибігу (поздовжня сила в автозчепленні відсутня) і на внутрішній рейковій нитці є вертикальні нерівності. Центр тяжіння рухомого вантажу змінює своє положення, і навіть у плавній кривій перша по ходу колісна пара розвантажується та вкочується на рейку [9, 14].

Основною причиною сходження внаслідок провалу колеса всередину колії є неприпустима величина розширення колії, що виникає завдяки відтисканню гребенем колеса однієї з рейок. При цьому друге колесо провалюється всередину колії. Таке сходження можливе лише за однієї з умов або їх поєднання:

- головною умовою є дія великої поперечної бокової сили від колеса, яка здатна відтиснути рейку;

- недостатній опір такому відтисканню рейки внаслідок її недостатньої поперечної жорсткості;

- наявність ослаблених проміжних рейкових скріплень, які не забезпечують необхідну вертикальну та горизонтальну жорсткість.

Імовірність такого сходження вища в крутих кривих, на дерев'яних шпалах, на рейках із невисокою поперечною жорсткістю та в разі костильного скріплення внаслідок нахилу рейки гребенями. У такому випадку розпирання колії з провалом колеса відбувається за значно меншої бокової впливу коліс, ніж сходження через зсув решітки на обох основних типах підрейкової основи. Чим менше завантаження вагона, тим імовірніше сходження через розпирання колії. У випадку завантаження вагонів до повної вантажопідйомності опір розпору значно більший [9].

На ділянках із дерев'яними шпалами та типовим костильним скріпленням, порівняно з ділянками із залізобетонними шпалами, істотно полегшене сходження рухомого складу через витискання екіпажів унаслідок можливості нахилу рейки через відрив внутрішньої кромки подошви рейки від підкладок. Під час руху візка з притиснутими до голівки рейки гребенями коліс відбувається підсмикування внутрішніх обшивних костилів та пружний нахил рейки з подальшим відновленням ширини колії після проходження такого візка. Чим більша сила

бокового впливу гребенів коліс на голівку рейки і чим менша вертикальна сила, тим на більшу величину підсмикуються внутрішні обшивні костилі [9, 15, 22].

Збільшення рівня сил взаємодії між залізничними екіпажами та колією можливе також у разі значного зносу колісних пар та рейок. Реборди підп'ятників і бокові грані п'ятників вантажних вагонів у процесі експлуатації зношуються, й утворюється горизонтальний люфт між ними, який у ряді випадків перевищує 5 мм. Шкворневий отвір також стає овальним. На ребордах підп'ятників у верхній їх частині та на бокових гранях п'ятників у нижній їх частині метал зношується від дії горизонтальних сил, відбувається заокруглення внутрішнього обриса верху реборд підп'ятників й низу п'ятників. За наявними правилами шкворень у вантажних вагонів не повинен працювати, а тим часом він зношується, згинається й навіть ламається, зминаючи отвір, куди його вставляють. Значення ексцентриситету в перерізі шкворня візка тільки через боковий знос підп'ятника та п'ятника може досягати 10 мм [11].

Конструкційні параметри рухомого складу та колії у свою чергу впливають на величину поперечних сил, які виникають від дії поздовжніх сил в автозчепленнях вагона. Пристрій автозчеплення, який експлуатують на вітчизняних залізницях, не має стабілізуючого шарніра у хвостовику. Радіус заокруглення хвостовика автозчеплення – 130 мм, а опорна плита, на яку передається поздовжня сила поїзда хвостовиком автозчеплення, має радіус заокруглення 150 мм. Теоретично стискальна сила автозчепленням передається опорній плиті в точці, й у разі перекосів екіпажів за схемою «ялинки» ця точка контакту переміщується поперек екіпажа (рис. 2). Парк вантажного рухомого складу містить велику кількість вагонів із подовженим терміном служби. Вантажні вагони, що перебувають в експлуатації в наш час, спроектовані й побудовані за різними редакціями норм їх розрахунку й проектування. Неточність розташування розетки на кінцевій балці деяких вагонів може перевищувати 14 мм. Для вантажних вагонів це значення реально може становити 20 мм [9, 10].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 2. Передача автозчепленням поздовжнього зусилля з ексцентриситетом

Fig. 2. Transmission of longitudinal force with eccentricity by automatic coupler

У роботі [8] розглянуто поперечне зміщення візків один відносно одного. Узято, що задній візок розташований по поздовжній осі колії, а передній має поперечне зміщення, що відповідає початковому куту повороту кузова в плані відносно осі колії в межах від 0,002 до 0,008 рад зі знаком «плюс», за якого збільшується кут набігання передньої колісної пари на рейку. Наведено теоретичні дослідження з визначення впливу поперечного зміщення візків на основні динамічні показники – коефіцієнт вертикальної динаміки, коефіцієнт стійкості, рамні сили, прискорення в зоні п'ятників. Проте в цій роботі не наведено вплив означеного зміщення на показники взаємодії рухомого складу з колією.

Мета

Робота спрямована на визначення впливу поперечного зміщення візка вантажного вагона з урахуванням величини швидкості руху на його основні динамічні показники та показники взаємодії рухомого складу з колією.

Методика

Кількісна оцінка динамічних показників може бути отримана методом математичного моделювання. Розрахункова схема вагона повинна відображати особливості взаємодії вагонів у складі потяга: можливість прояву всіх форм коливань кузова в просторі, передачі поз-

довжньої сили у вертикальному та горизонтальному напрямках від сусідніх вагонів, облік технічного стану окремих частин вагона та їх конструктивних особливостей, а також умов експлуатації – швидкість, рух по прямих і кривих ділянках залізничної колії, режим завантаження, вид вантажу, його розміщення й кріплення, вертикальні та горизонтальні нерівності колії [7, 12, 13].

Для проведення дослідження узято математичну модель просторових коливань вантажного вагона у вигляді багатомасової (кузов, дві надресорні балки, чотири бокові рами, чотири колісні пари) нелінійної механічної системи, яка рухається по інерційній, пружнодисипативній колії [4]. У роботі [5] запропонована математична модель, що описує просторові коливання зчепу вагонів у складі потяга (рис. 3) у яких один рейковий екіпаж розглядають за повною розрахунковою схемою («нульовий»), а розрахункові схеми сусідніх вагонів, залежно від постановки задачі, спрощують по мірі віддалення від «нульового» екіпажа в обидві сторони.

Ця робота присвячена дослідженню впливу на основні динамічні показники та показники взаємодії рухомого складу з колією вантажних вагонів у кривих одного з чинників, а саме зміни кута повороту центральної осі кузова вагона ψ_b . Вибір цього фактора як предмета дослідження пов'язаний із тим, що він залежить від величини поперечного зазору в рейковій колії.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У свою чергу від цього зазору залежать відносні пружні й непружні проковзування коліс відносно рейок та величини відповідних сил, а та-

кож геометричні умови контактування коліс і рейок. Крім того, необхідна величина поперечного зазору визначає ширину рейкової колії.

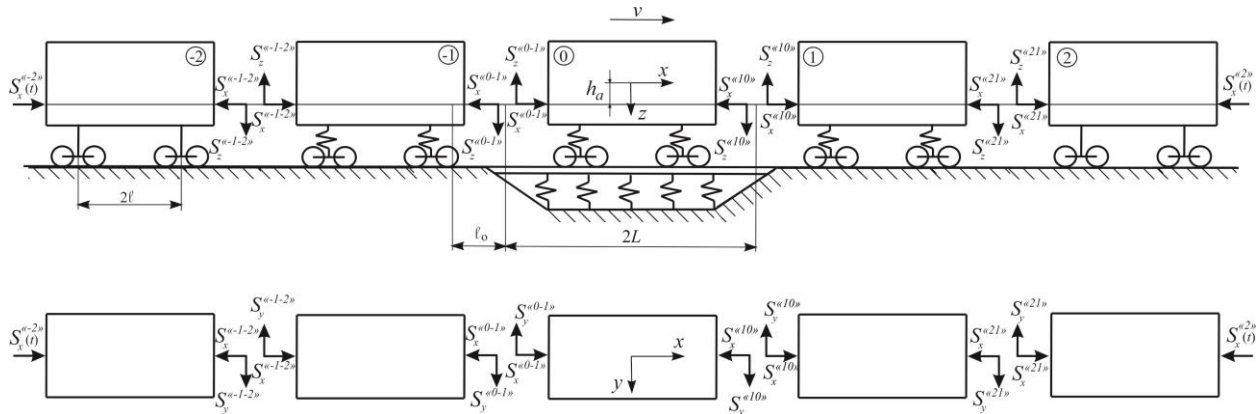


Рис. 3. Схема розташування зчепу вагонів у складі потяга в разі передачі поздовжнього зусилля

Fig. 3. Diagram of the coupler location in the train in case of transmission of longitudinal force

Під час розрахунків розглянуто зміну кута повороту центральної осі кузова вагона ψ_B , який призводить до поперечного зміщення візків відносно один одного, що є продовженням дослідження, наведеного в роботі [8]. Задній візок вантажного вагона розташований по поз-

довжній осі колії, а передній має поперечне зміщення, що відповідає куту повороту кузова в плані відносно осі колії в межах від 0 до 0,008 рад зі знаком «плюс», за якого збільшується кут набігання передньої колісної пари на зовнішню рейку (рис. 4).



Рис. 4. Розташування візків вантажного вагона в рейковій колії

Fig. 4. Location of freight car bogies in the rail track

Як відомо, повний зазор у рейковій колії визначають за формулою [3]: $2\delta = 2S - 2T - 2d - 2\mu + \Delta$, де $2S = 1520$ мм – ширина рейкової колії; $2T = 1437$ мм мінімальна відстань між внутрішніми гранями гребенів коліс; d – товщина гребеня колеса в розрахунковій площині, яка в процесі експлуатації змінюється від прийнятої номінальної $d_{\text{ном}} = 30$ мм до мінімального значення $d_{\text{мін}} = 25$ мм; $2\mu = 2$ мм – потовщення гребенів вагонних коліс, вище за розрахункову площину, Δ – розширення рейкової колії.

ну, Δ – розширення рейкової колії.

Найбільша ширина колії допускається 1548 мм, тобто $\Delta = 28$ мм. У цьому випадку за мінімальної товщини гребеня $d_{\text{мін}}$ та інших номінальних параметрів найбільше значення зазору в колії становитиме $2\delta_{\text{max}} = 59$ мм.

Для більшої наочності отриманих результатів необхідно встановити залежність відповідних значень між повним зазором у рейковій колії 2δ та кутом повороту центральної осі кузова вагона ψ_B . Ураховуючи геометричні роз-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

міри піввагона моделі 12–532 та залізничної колії, отримуємо, що за товщини гребеня $d = 33$ мм і $\Delta = 28$ повний зазор у колії $2\delta = 43$ мм та відповідно $\psi_B = 0,005$ рад. За номінальної товщини гребеня 30 мм – $2\delta = 49$ мм, а $\psi_B \approx 0,006$ рад. Повний зазор у рейковій колії 2δ може варіюватися від 0 до 59 мм, але кузов вагона може додатково обертатись за рахунок зношеності частин рухомого складу.

Сумарний вільний поперечний розбіг рами кузова вагона відносно осі колії в напрямному перерізі по шворню (за рахунок поперечних розбігів колісних пар у рейковій колії, рами візка відносно колісних пар, надресорної балки

відносно рами (візка) і шворневої балки кузова відносно надресорної балки) нормативною документацією рекомендовано вважати для вантажних чотирирівісних вагонів із безколісковим підвішуванням візків $2\delta_0 = 50$ мм. З урахуванням того, що боковий знос підп'ятника та п'ятника може досягати 10 мм, а неточність розташування розетки на кінцевій балці деяких вагонів – 20 мм, кут повороту центральної осі кузова вагона також становитиме $\psi_B = 0,008$ рад. Відповідність значень між 2δ , $2\delta_0$ й ψ_B наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Відповідність значень досліджуваних параметрів

Table 1

Correspondence of values of parameters under study

Параметр	Відповідність між значеннями								
	0	9	17	26	35	43	52	59	59
2δ , мм	0	9	17	26	35	43	52	59	59
$2\delta_0$, мм	0	9	17	26	35	43	52	60	69
ψ_B , рад	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008

Вихідні дані для теоретичного дослідження: рух піввагона моделі 12–532 з типовими візками 18–100 зі швидкостями в інтервалі від $50 \div 90$ км/год в кривій радіусом 600 м із підвищеннями зовнішньої рейки 120 мм. Рейки – Р65, шпали – дерев'яні, баласт – щебеневий. Досліджено стаціонарний рух із метою встановлення впливу тільки розглянутого фактора.

Ходові частини вагона, поверхня кочення колеса й профіль головки рейки було передбачено в нормальному технічному стані.

Рівні оцінки та допустимі значення показників динамічних якостей вантажного рухомого складу відповідно до нормативної документації наведені в табл. 2 [6].

Таблиця 2

Рівні оцінки та допустимі значення показників динамічних якостей

Table 2

Levels of estimation and admissible values of indicators of dynamic qualities

Показник	Рівень оцінки	Допустимі значення	
		порожній	завантажений
Максимальний коефіцієнт динамічної добавки обресорених частин (коефіцієнт вертикальної динаміки центрального ступеня підвішування) $K_{дв}^o$	відмінно	0,5	0,2
	добре	0,6	0,35
	задовільно	0,7	0,4
	припустимий	0,75	0,65

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження табл. 2
Continuation of Table 2

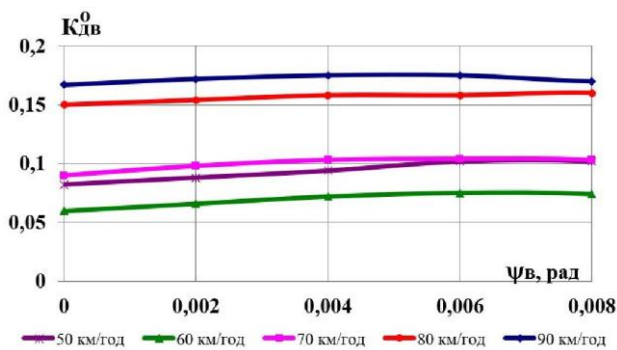
Показник	Рівень оцінки	Допустимі значення	
		порожній	завантажений
Максимальний коефіцієнт динамічної добавки необресорених частин (коефіцієнт вертикальної динаміки буксового ступеня підвищення) $K_{дв}^{но}$	відмінно	0,6	0,5
	добре	0,75	0,7
	задовільно	0,85	0,8
	припустимий	0,98	0,9
Максимальне відношення рамної сили до статичного осьового навантаження (коефіцієнт горизонтальної динаміки) $K_{дг}$	відмінно	0,25	0,2
	добре	0,3	0,25
	задовільно	0,38	0,3
	припустимий	0,4	0,38
Коефіцієнт стійкості від сходження колеса з рейок $K_{ст}$	припустимий	1,3	

Результати

Динамічні сили та процеси, які діють у складових частинах візка або кузова вагона, вивчають за допомогою максимальних коефіцієнтів динамічної добавки обресорених $K_{дв}^o$ і необресорених частин $K_{дв}^{но}$, максимального

відношення рамної сили до статичного осьового навантаження $K_{дг}$ та коефіцієнта стійкості від сходження колеса з рейок $K_{ст}$. Графіки зміни динамічних показників під час руху по кривій ділянці колії $R = 600$ м наведені на рис. 5, 6.

а – а



б – б

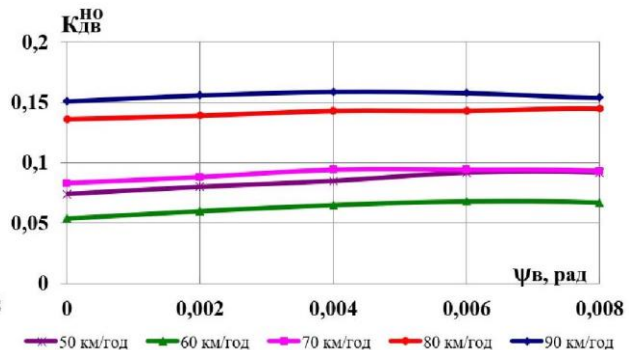


Рис. 5. Графіки зміни динамічних показників від швидкості руху:

а – коефіцієнта динамічної добавки обресорених частин;

б – коефіцієнта динамічної добавки необресорених частин

Fig. 5. Graphs of change of dynamic from the movement speed:

а – coefficient of dynamic additive of sprung parts;

б – coefficient of dynamic additive of unsprung parts

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Як видно з рис. 5, зі збільшенням кута повороту кузова в плані відносно осі колії досліджувані динамічні коефіцієнти в цілому залишаються незмінними. У всьому інтервалі швидкостей показники $K_{дв}^o$ (рис. 5, *a*), $K_{дв}^{но}$ (рис. 5, *б*) в разі збільшення ψ_b від 0 до 0,008 рад не перевищують допустиму норму. Рівень оцінок – «відмінно» [6].

З отриманих результатів можна зробити висновки, що кут повороту кузова в плані відносно осі колії ψ_b в разі збільшення швидкості руху не викликає істотного збільшення показ-

ників вертикальної динаміки в буксовому та центральному ступенях підвішування, а їх значення не перевищують величин, визначених нормативною документацією.

Максимальне відношення рамної сили до статичного осьового навантаження $K_{др}$ (рис. 6, *a*) та коефіцієнт стійкості від сходження колеса з рейок $K_{ст}$ (рис. 6, *б*) в разі збільшення ψ_b не перевищують допустиму норму. Рівень оцінок для $K_{др}$ – «відмінно», $K_{ст}$ – вище допустимого [6].

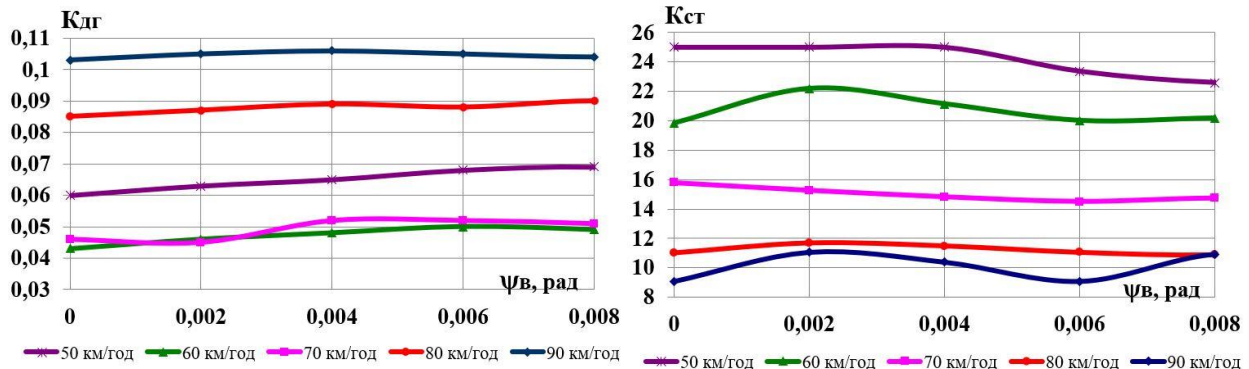


Рис. 6. Графіки зміни динамічних показників від швидкості руху:
a – максимального відношення рамної сили до статичного осьового навантаження;
б – коефіцієнта стійкості від сходження колеса з рейок

Fig. 6. Graphs of change of dynamic indicators from the movement speed:
a – maximum ratio of the frame force to the static axial load;
b – derailment stability coefficient

На рис. 7 показано вплив швидкості на показники взаємодії рухомого складу з колією в кривій $R=600$ м – бокової сили, що діє від колії на колесо Y_6 та кромкового напруження в підшві рейки σ_p . Бокові сили Y_6 , що діють від колії на колесо (горизонтальні сили) (рис. 7, *a*), зростають та мають максимум за $\psi_b = 0,006$ рад і порівняно з допустимим значенням $[Y_6] = 90$ кН для забезпечення умови стійкості проти наповзання гребенів коліс на рейки не мають перевищень.

Кут повороту центральної осі кузова вагона ψ_b в значній мірі залежить від сил взаємодії

контактуючих тіл і їх відносних переміщень (відносних проковзувань). Ці сили й переміщення визначаються умовами взаємодії коліс рухомого складу та колії. Умови взаємодії тіл цієї системи залежать як від конструкції, технічного стану й режимів руху рухомого складу, так і від конструкції, стану й параметрів рейкової колії. Але саме за номінальної товщини гребеня колеса та за $2\delta_0 = 52$ мм ($\psi_b = 0,006$ рад) отримано максимальні значення бокової сили Y_6 . Порівняно з максимальною товщиною гребеня та $\psi_b = 0,005$ рад ці значення більші в середньому на 9,5 %.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

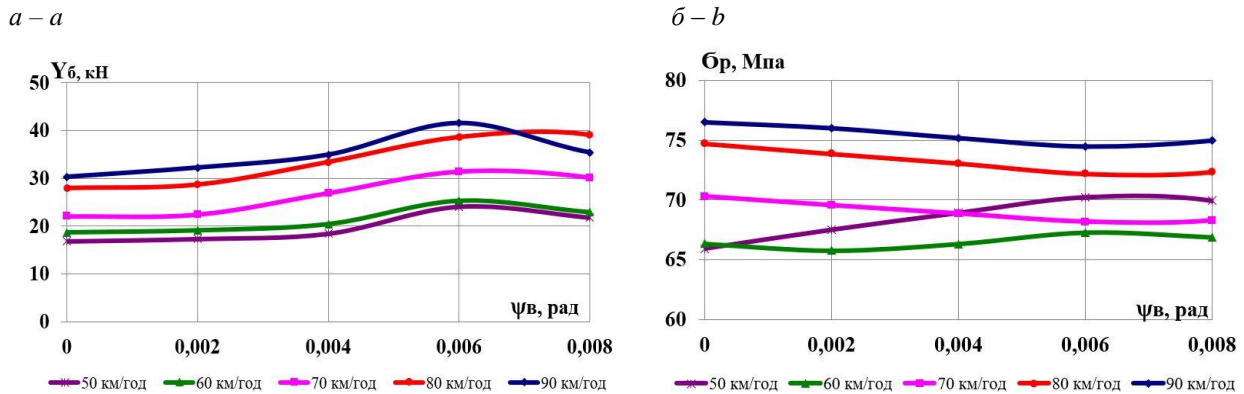


Рис. 7. Графіки зміни динамічних показників від швидкості руху:

a – бокової сили, що діє від колії на колесо;
 b – кромкового напруження в підшві рейки

Fig. 7. Graphs of change of dynamic indicators from the movement speed:

a – lateral force acting from the track on the wheel;
 b – edge stress in the rail base

Під час підвищення швидкостей руху поїздів зростає динамічний вплив на колію рухомого складу і, як наслідок, зростають напруження в кромках підшви рейок. Максимальні напруження, що виникають у кромках підшви рейки, використовують як критерій для встановлення допустимих швидкостей. Вони не повинні перевищувати 215 МПа до пропуску й 165 МПа після пропуску нормативного тонуажу для колії з нетермообробленими рейками Р65 [3]. Але у випадку розглянутої схеми розташування візків вантажного вагона в рейковій колії відбувається перерозподіл вертикальних

та горизонтальних реакцій в зоні контакту колеса та рейки. За результатами обчислень, кромкові напруження (рис. 7, b) зростають у разі підвищення швидкості руху, але мають мінімум саме за $\psi_v = 0,006$ рад в інтервалі швидкостей 70 ÷ 90 км/год та максимум за 50 ÷ 60 км/год. Проте отримані результати не перевищують допустимих значень для обох типів рейок [3].

На рис. 8 наведено коефіцієнти вертикальної $K_{вдк}$ й горизонтальної динаміки $K_{гдк}$ колії за силами взаємодії коліс із рейками.

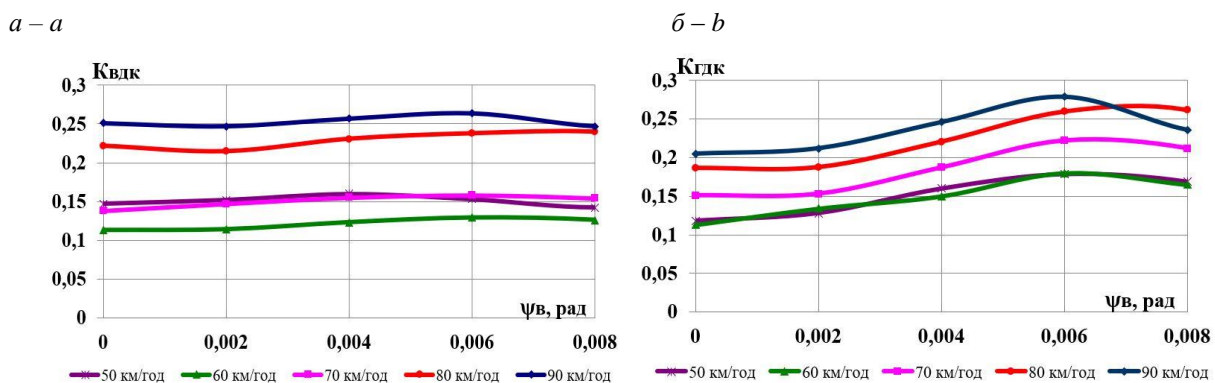


Рис. 8. Графіки зміни динамічних показників від швидкості руху:

a – коефіцієнта вертикальної динаміки колії за силами взаємодії коліс із рейками;
 b – коефіцієнта горизонтальної динаміки колії за силами взаємодії коліс із рейками

Fig. 8. Graphs of change of dynamic indicators from the movement speed:

a – vertical dynamics coefficient of the track according to the interaction forces of the wheels and the rails;
 b – horizontal dynamics coefficient of the track according to the interaction forces of the wheels and the rails

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Допустиме значення коефіцієнта вертикальної динаміки колії $K_{вдк}$ розраховують відповідно до допустимого динамічного погонного навантаження на залізничну колію від групи осей візка 168 кН/м, воно становить для цього типу рухомого складу $[K_{вдк}] = 0,45$ [3]. Коефіцієнт вертикальної динаміки колії $K_{вдк}$ (рис. 8, *a*) не перевищує допустимого значення. Коефіцієнт горизонтальної динаміки колії $K_{гдк}$

(рис. 8, *б*), який вважають критерієм безпеки від зсуву рейко-шпальної решітки, не перевищує допустимого значення $[K_{гдк}] = 0,4$ та також має істотний максимум в усьому інтервалі розглянутих швидкостей за $\psi_b = 0,006$ рад.

На рис. 9 наведено коефіцієнти стійкості рейко-шпальної решітки від уgonу (зсуву) ε та фактора зносу бокової грані бандажа колеса Φ .

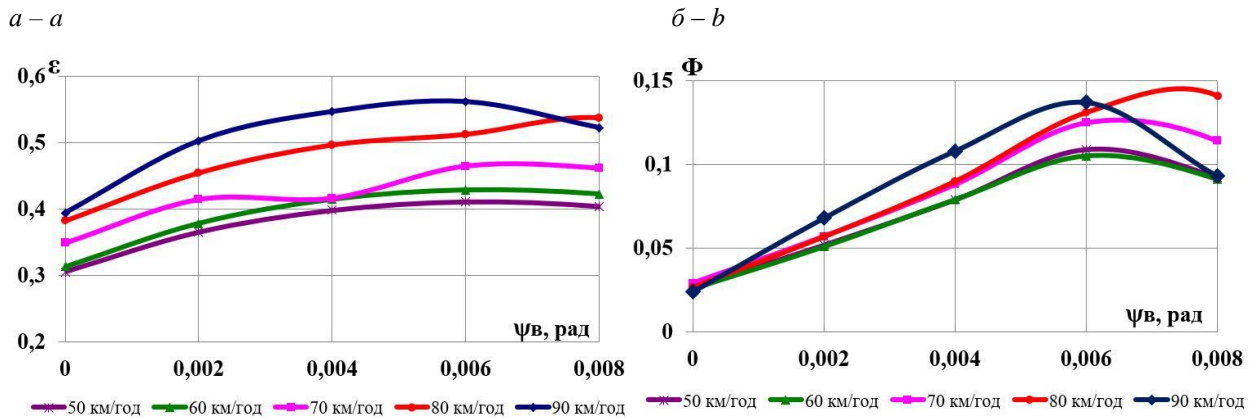


Рис. 9. Графіки зміни динамічних показників від швидкості руху:
a – коефіцієнта стійкості рейко-шпальної решітки від дії поперечних сил;
б – фактора зносу бокової грані бандажа колеса

Fig. 9. Graphs of change of dynamic indicators from speed of movement:
a – stability coefficient of the track panel from the action of lateral forces;
b – wear factor of the lateral edge of the wheel rim

Значення коефіцієнта стійкості рейко-шпальної решітки від дії поперечних сил ε (рис. 9, *a*) в колії зі щебеним баластом за результатами розрахунку становить 0,3–0,56, що менше допустимої величини $[\varepsilon] = 0,85$ [3].

Зі збільшенням швидкості руху (наприклад, за швидкостей 70 ÷ 90 км/год) значно зростає фактор зносу бокової грані бандажа колеса Φ (рис. 9, *б*), відповідні значення за 50 ÷ 60 км/год збільшуються в середньому на 22,43 %. По мірі зростання 2δ від 52 до 59 мм показник зносу гребеня падає, що свідчить про зростання терміну служби колісної пари. Як видно з рис. 9, показники ε та Φ також мають максимуми за $\psi_b = 0,006$ рад.

На рис. 10 наведено відтискання підшви y_p та головки рейки $y_{гр}$, оскільки як на ділян-

ках із дерев'яними шпалами існує висока ймовірність сходження через витискання екіпажів унаслідок можливості нахилу рейки.

Чим більша швидкість руху, тим на більшу величину y_p підсмикуються внутрішні обшивні костилі (рис. 10, *a*). В інтервалі швидкостей 50 ÷ 60 км/год зростання відтискань підшви рейок у середньому становить 9,59 % на кожні 10 км/год, а за швидкостей 70 ÷ 90 км/год відповідні значення зростають у середньому на 21,1 %. Для відтискання головки рейки $y_{гр}$ за результатами розрахунків такої чіткої залежності не отримано, але обидва показники мають максимальні значення за кута повороту центральної осі кузова вагона $\psi_b = 0,006$ рад.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

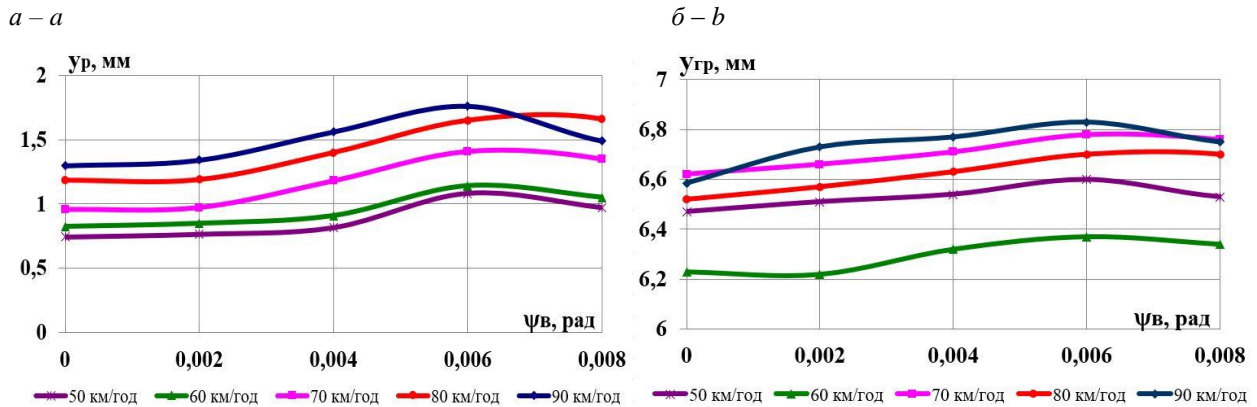


Рис. 10. Графіки зміни динамічних показників від швидкості руху:
 а – відтискання підшви рейки; б – відтискання головки рейки

Fig. 10. Graphs of change of dynamic indicators from the movement speed:
 а – squeezing of the rail base; б – squeezing of the rail head

У роботі [9] описано серію натурних експериментів зі сходження коліс із рейок через витискання екіпажів, розпирання та угону (зсуву) колії. Експерименти виконано за умови застосування дерев'яних і залізобетонних шпал, ще-

беневого, азбестового й піщаного баласту, добитих та підсмикнутих костилів. Схема проведення натурних експериментів зі сходження коліс з рейок через витискання вагона, розпирання та угону (зсуву) колії наведена на рис. 11.

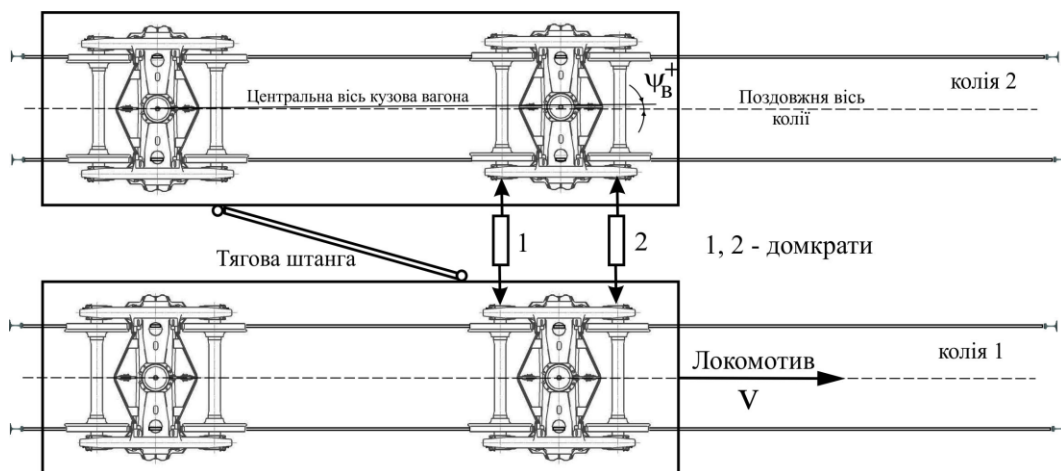


Рис. 11. Схема проведення натурних експериментів зі сходження коліс із рейок

Fig. 11. Scheme of field experiments on derailments

По першій колії двокільної ділянки (рис. 11) локомотивом переміщав 4-вісний піввагон зі швидкістю 15–25 км/год, завантажений щебенем до $P_{ст} = 27$ т/вісь. По другій колії за допомогою штанги синхронно переміщався такий самий 4-вісний піввагон, але з меншим завантаженням. У кожену буксу були вмонтовані розпирні гідравлічні домкрати 1 і 2, що дозволяють на ходу встановлювати розпираючу силу

H від 0 до 392 кН (по 196 кН на одну вісь). Установлені вздовж колії прилади фіксували відтискання головки та підшви рейки, у т. ч. її нахил за одночасного вимірювання динамометричними колісними парами сил бокового горизонтального впливу коліс на рейки. Заїзди повторювали багаторазово з доведенням у ряді випадків до сходження коліс через розпирання або угону (зсув) колії. На прямих ділянках колії

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

з дерев'яними шпалами з типовим костильним скріпленням для малозавантажених вагонів відтискання підшоши не перевищувало 1–1,5 мм за відтискання головки рейки 5,0–6,0 мм.

Наведені в цьому дослідженні розрахунки були проведені за осьового навантаження вагона 21,4 т на вісь і в інтервалі швидкостей 50 ÷ 90 км/год у кривій радіусом 600 м. Порівняння отриманих результатів розрахунку показує задовільну відповідність експериментальним даним за величинами u_p .

Наукова новизна та практична значимість

Доопрацьовано математичну модель зчепу вантажних вагонів у складі поїзда. У розрахункових схемах, що описують коливання вагонів, враховано особливості візків вантажних вагонів – забігання бокових рам. Модель дозволяє дослідити вплив зміни кута повороту центральної осі кузова вагона, що у свою чергу призводить до поперечного зміщення візків відносно один одного, на основні динамічні показники та показники взаємодії рухомого складу з колією. Уперше досліджено вплив поперечного зміщення візка з урахуванням зносів його деталей та вузлів під час руху на ділянках колії з нерівностями.

Це дослідження виконано в напрямі розвитку методів математичного моделювання динамічних процесів взаємодії рухомого складу та колії. Результати розрахунків можна застосовувати під час оцінювання впливу поперечного зміщення візка на динамічні якості рухомого складу та показники взаємодії рухомого складу з колією з урахуванням зносів деталей та вузлів візка під час руху в прямих і криволінійних ділянках колії з нерівностями.

Застосування отриманих результатів сприятиме підвищенню стійкості вантажного рухомого складу в умовах підвищення швидкостей руху, що у свою чергу дозволить розробити

технічні умови для реалізації ресурсозбережних технологій транспортування вантажів, які відповідають вимогам безпеки руху поїздів.

Висновки

У статті представлено аналіз проведених теоретичних досліджень основних динамічних показників та показників взаємодії рухомого складу з колією на прикладі піввагонів моделі 12–532. На підставі проведених досліджень динамічної навантаженості вантажного рухомого складу за наявності поперечного зміщення візків можна зробити такі висновки:

- максимальні коефіцієнти динамічної добавки обресорених $K_{дв}^o$ і необресорених частин $K_{дв}^{но}$, максимальне відношення рамної сили до статичного осьового навантаження $K_{дг}$ та коефіцієнт стійкості від сходження колеса з рейок $K_{ст}$ більше залежать від швидкості руху, ніж від кута повороту центральної осі кузова вагона ψ_v ;
- проаналізовані показники взаємодії рухомого складу з колією не перевищують нормативних значень та мають екстремуми за $\psi_v = 0,006$ рад;
- одночасне збільшення кута повороту центральної осі кузова вагона ψ_v та швидкості руху призводить до підвищення фактора зносу коліс та рейок;
- зі збільшенням швидкості руху відтискаються внутрішні обшивні костилі u_p та головки рейок $u_{гр}$, обидва показники мають максимальні значення в разі кута повороту центральної осі кузова вагона $\psi_v = 0,006$ рад;
- отримані результати розрахунків відповідають експериментальним даним за величинами відтискань підшоши рейки u_p .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акулов А. С., Железнов К. І., Заболотний О. М., Пуларія А. Л., Чабанюк Є. В., Швець А. О. Розробка програмного комплексу «Тренажер оглядача вагонів». *Вагонний парк*. 2018. № 6 (138). С. 18–21.
2. Блохин Е. П., Коротенко М. Л., Луханин Н. И. Динамика подвижного состава и безопасность движения. *Перспективи впровадження технічних засобів безпеки руху на залізницях України : зб. наук. пр. 10-ї наук.-практ. конф.* (Київ, 8-10 верес. 2010 р.). Київ, 2010. С. 16–21.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Даніленко Е. І. *Залізнична колія* : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. Київ : Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
4. Данович В. Д. *Пространственные колебания вагонов на инерционном основании* : дис. ... д-ра техн. наук. Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1981. 465 с.
5. Данович В. Д., Малышева А. А. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути. *Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава* : сб. науч. тр. Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1998. С. 62–69.
6. *ДСТУ ГОСТ 33211:2017. Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014, IDT)*. [Чинний від 2017-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 58 с.
7. Курган Д. М., Губар О. В., Гаврилов М. О. Методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейку. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 3 (87). С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208202>
8. Луханин Н. И., Мямлин С. В., Недужая Л. А., Швець А. А. Динамика грузовых вагонов с учетом поперечного смещения тележек. *Зб. наук. праць Донецького інституту заліз. тр-ту*. 2012. Вип. 29. С. 234–241.
9. Лысюк В. С. *Причины и механизмы схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов* : 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 2002. 215 с.
10. Мугинштейн Л. А., Ромен Ю. С. Влияние продольных сил на опасность сходов порожних вагонов в поездах. *Вестник ВНИИЖТ*. 2011. № 3. С. 3–6.
11. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятиколового вузла вантажного вагону. *Залізничний транспорт України*. 2018. Вип. 1. С. 34–41.
12. Швець А. О. Визначення стійкості вантажних вагонів з урахуванням параметрів залізничної колії. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 2 (86). С. 103–118. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203421>
13. Швець А. О. Динаміка піввагонів від дії поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 142–155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821>
14. Cao T. N. T., Reddy J. N., Ang K. K., Luong V. H., Tran M. T., Dai J. Dynamic analysis of three-dimensional high-speed train-track model using moving element method. *Advances in Structural Engineering*. 2018. Vol. 21. Iss. 6. P. 862–876. DOI: <https://doi.org/10.1177/1369433217733763>
15. Hazrati Ashtiani I., Rakheja S., Ahmed A. Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. Iss. 8. P. 877–891. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716647095>
16. Kampczyk A. Measurement of the Geometric Center of a Turnout for the Safety of Railway Infrastructure Using MMS and Total Station. *Sensors*. 2020. Vol. 20. Iss. 16. P. 1–35. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20164467>
17. Kurhan M., Kurhan D. Providing the Railway Transit Traffic Ukraine–European Union. *Pollack Periodica*. 2019. Vol. 14. Iss. 2. P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.3>
18. Mei H., Leng W., Nie R., Tu R., Li Y., Dong J. Experimental research on the dynamic response characteristics of the transition subgrade induced by heavy-haul train passage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. Vol. 233. Iss. 9. P. 974–987. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718822924>
19. Rezvani M. A., Mazraeh A. Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2017. Vol. 61. P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011>
20. Sysyn M., Nabochenko O., Kovalchuk V. Experimental investigation of the dynamic behavior of railway track with sleeper voids. *Railway Engineering Science*. 2020. Vol. 28. Iss. 3. P. 290–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00217-8>
21. Xing L. L., Wang Y. M., Dong X. Q. Effect of the Wheel/Rail contact geometry on the stability of railway vehicle. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 392. Iss. 6. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062134>
22. Ye Y., Ning J. Small-amplitude hunting diagnosis method for high-speed trains based on the bogie frame's lateral–longitudinal–vertical data fusion, independent mode function reconstruction and linear local tangent space alignment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. Vol. 233. Iss. 10. P. 1050–1067. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718825412>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

23. Zhu T., Yang B., Yang C., Xiao S., Yang G., Yang B. The mechanism for the coupler and draft gear and its influence on safety during a train collision. *Vehicle System Dynamics*. 2018. Vol. 56. Iss. 9. P. 1375–1393. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1413198>

А. А. ШВЕЦ^{1*}

^{1*}Каф «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПОПЕРЕЧНОГО СМЕЩЕНИЯ ТЕЛЕЖЕК

Цель. Работа направлена на определение влияния поперечного смещения тележки грузового вагона с учетом величины скорости движения на его основные динамические показатели и показатели взаимодействия подвижного состава с колеей. **Методика.** Количественная оценка динамических показателей получена методом математического и компьютерного моделирования. Расчетная схема учитывает особенности взаимодействия вагонов в составе поезда: возможность проявления всех форм колебаний кузова в пространстве, передачу продольной силы в вертикальном и горизонтальном направлениях от соседних вагонов, учет технического состояния отдельных частей вагона и их конструктивных особенностей, а также различные условия эксплуатации. **Результаты.** В процессе исследования применена математическая модель сцепа из пяти грузовых вагонов для изучения динамической нагруженности полувагона и пути. Проведена оценка основных динамических показателей и показателей взаимодействия подвижного состава с колеей в случае поперечного смещения тележки при движении по криволинейным участкам железнодорожного пути. Обосновано максимально возможные величины поперечного смещения тележки грузового вагона. **Научная новизна.** Доработана математическая модель сцепа грузовых вагонов в составе поезда. В расчетных схемах, описывающих колебания, учтены особенности тележек грузовых вагонов – забегания боковых рам. Модель позволяет исследовать влияние изменения угла поворота центральной оси кузова вагона, что в свою очередь приводит к поперечному смещению тележек относительно друг друга, на основные динамические показатели и показатели взаимодействия подвижного состава с колеей. Впервые исследовано влияние поперечного смещения тележки с учетом износов её деталей и узлов при движении на участках пути с неровностями. **Практическая значимость.** Результаты расчетов можно применять при оценке влияния поперечного смещения тележки на динамические качества подвижного состава и показатели взаимодействия подвижного состава с колеей с учетом износов деталей и узлов тележки при движении в прямых и криволинейных участках пути с неровностями. Применение полученных результатов будет способствовать повышению устойчивости грузового подвижного состава в условиях повышения скоростей движения, что в свою очередь позволит разработать технические условия для реализации ресурсосберегающих технологий транспортировки грузов, отвечающих требованиям безопасности движения поездов.

Ключевые слова: безопасность движения; динамические показатели; смещение тележек; полувагон; скорость движения

А. О. SHVETS^{1*}

^{1*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

INFLUENCE OF LATERAL DISPLACEMENT OF BOGIES ON THE FREIGHT CAR DYNAMICS

Purpose. The work is aimed at determining the influence of the lateral displacement of a freight car bogie, taking into account the value of the movement speed on its main dynamic indicators and interaction indicators of the rolling stock and the track. **Methodology.** The quantitative assessment of dynamic indicators was obtained by the

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

method of mathematical and computer modeling. The design scheme of the car takes into account the interaction peculiarities of cars as part of the train: the possibility of all modes of body vibration in space, the transmission of longitudinal force from neighboring cars in vertical and horizontal directions, taking into account the technical condition of individual parts of the car and their design features, as well as various operating conditions. **Findings.** During the research, a mathematical model of a coupling of five freight cars was applied to study the dynamic loading of a gondola car and a track. Main dynamic and interaction indicators of the rolling stock and the track in case of transverse bogie displacement when moving along curved track sections assessment were assessed. The maximum possible values of the lateral displacement of the freight car bogie were substantiated. **Originality.** The mathematical model of the coupling of freight cars in the train has been improved. In the calculation schemes describing the vibrations of the cars, the peculiarities of the freight car bogies, lozenging of the bogie side frames are taken into account. The model makes it possible to study the effect of changing rotation angle of the central axis of the car body, which in turn leads to the lateral displacement of bogies relative to each other, on the main dynamic and interaction indicators of the rolling stock and the track. For the first time, the influence of transverse displacement of the bogie was investigated, taking into account the wear of its parts and assemblies when moving on track sections with unevenness. **Practical value.** The calculation results can be used to assess the influence of the bogie transverse displacement on the dynamic qualities of the rolling stock and interaction indicators of the rolling stock and the track, taking into account the wear of parts and units of the bogie when moving in straight and curved track sections with irregularities. The application of the results obtained will contribute to an increase in the stability of freight rolling stock in the conditions of increasing travel speeds, which in turn will allow developing technical conditions for the implementation of resource-saving technologies for transporting goods that meet the safety requirements of train traffic.

Keywords: traffic safety; dynamic indicators; displacement of bogies; gondola car; movement speed

REFERENCES

1. Akulov, A. S., Zheliezov, K. I., Zabolotnyi, O. M., Pulariia, A. L., Chabaniuk, Ye. V., & Shvets, A. O. (2018). Development of the Software Complex «Simulator of the Railway Carriage Inspector». *Vaghomnyj park*, 6, 18-21. (in Ukrainian)
2. Blokhin, E. P., Korotenko, M. L., & Lukhanin, N. I. (2010). Rolling stock dynamics and traffic safety. In *Perspektyvy vprovadzhennia tekhnichnykh zasobiv bezpeky rukhu na zaliznytsiakh Ukrainy: Tezisy X nauchno-prakticheskoy konferentsii* (pp. 16-20). Kiev, 16-20. (in Russian)
3. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna koliia*. (Vol. 2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
4. Danovich, V. D. (1982). *Spatial Cars Oscillations in Inertia Track*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
5. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. In *Transport. Stress loading and durability of a rolling stock*, 62-69. Dnepropetrovsk. (in Russian)
6. *Vahony vantazhni. Vymohy do mitsnosti ta dynamichnykh yakosti*, 58 DSTU 33211:2017 (2017). (in Ukrainian)
7. Kurhan, D. M., Hubar, O. V., & Havrilov, M. O. (2020). Methodology for engineering calculation of stability coefficient against wheel climbing on the rail. *Science and Transport Progress*, 3(87), 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208202> (in Ukrainian)
8. Lukhanin, N. I., Myamlin, S. V., Neduzhaya, L. A., & Shvets, A. A. (2012). Dinamika gruzovykh vagonov s uchetom poperechnogo smeshcheniya telezhek. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 29, 234-241. (in Russian)
9. Lysyuk, V. S. (2002). *Prichiny i mekhanizmy skhoda koleasa s relsa. Problema iznosa koleas i relsov*. Moscow: Transport. (in Russian)
10. Muginshteyn, L. A., & Romen, Yu. S. (2011). Vliyanie prodolnykh sil na opasnost skhodov porozhnykh vagonov v poezdakh. *Vestnik VNIIZhT*, 3, 3-6. (in Russian)
11. Myamlin, S. V., Muradian, L. A., & Podosenov, D. O. (2018). Increase of reliability of thrust bearing of freight car. *Railway transport of Ukraine*, 1, 34-41. (in Ukrainian)
12. Shvets, A. O. (2020). Determination of the Stability of Freight Cars Taking Into Account the Railway Track Parameters. *Science and Transport Progress*, 2(86), 103-118. DOI: 10.15802/stp2019/195821 (in Ukrainian)
13. Shvets, A. O. (2019). Gondola cars dynamics from the action of longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 6(84), 142-155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821> (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Cao, T. N. T., Reddy, J., Ang, K. K., Luong, V. H., Tran, M. T., & Dai, J. (2017). Dynamic analysis of three-dimensional high-speed train-track model using moving element method. *Advances in Structural Engineering*, 21(6), 862-876. DOI: <https://doi.org/10.1177/1369433217733763> (in English)
15. Hazrati Ashtiani, I., Rakheja, S., & Ahmed, A. (2016). Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(8), 877-891. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716647095> (in English)
16. Kampczyk, A. (2020). Measurement of the Geometric Center of a Turnout for the Safety of Railway Infrastructure Using MMS and Total Station. *Sensors*, 20(16), 1-35. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20164467> (in English)
17. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2019). Providing the railway transit traffic Ukraine–European Union. *Pollack Periodica*, 14(2), 27-38. DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.3> (in English)
18. Mei, H., Leng, W., Nie, R., Tu, R., Li, Y., & Dong, J. (2019). Experimental research on the dynamic response characteristics of the transition subgrade induced by heavy-haul train passage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(9), 974-987. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718822924> (in English)
19. Rezvani, M. A., & Mazraeh, A. (2017). Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 61, 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011> (in English)
20. Sysyn, M., Nabochenko, O., & Kovalchuk, V. (2020). Experimental investigation of the dynamic behavior of railway track with sleeper voids. *Railway Engineering Science*, 28(3), 290-304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00217-8> (in English)
21. Xing, L. L., Wang, Y. M., & Dong, X. Q. (2018). Effect of the Wheel/Rail contact geometry on the stability of railway vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 392(6), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062134> (in English)
22. Ye, Y., & Ning, J. (2019). Small-amplitude hunting diagnosis method for high-speed trains based on the bogie frame's lateral–longitudinal–vertical data fusion, independent mode function reconstruction and linear local tangent space alignment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(10), 1050-1067. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718825412> (in English)
23. Zhu, T., Yang, B., Yang, C., Xiao, S., Yang, G., & Yang, B. (2017). The mechanism for the coupler and draft gear and its influence on safety during a train collision. *Vehicle System Dynamics*, 56(9), 1375-1393. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1413198> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.08.2020

Прийнята до друку: 03.12.2020

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 692.232.4

А. В. РАДКЕВИЧ¹, Т. В. ТКАЧ², К. М. НЕТЕСА^{3*}

¹Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 02, ел. пошта anatoij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

²Каф. «Планування і організація будівництва», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (096) 231 35 79, ел. пошта taisiatkach@gmail.com, ORCID 0000-0002-9433-7514

^{3*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, +38 (095) 062 60 09, ел. пошта netesakostia@meta.ua, ORCID 0000-0002-4087-5552

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОЇ ФАСАДНОЇ СИСТЕМИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

Мета. За основну мету роботи автори ставлять сформувані алгоритм вибору раціональної фасадної системи для конкретного будівельного об'єкта з урахуванням кліматичних, організаційно-технологічних та експлуатаційних властивостей, який може бути застосований будь-яким учасником будівельного процесу. **Методика.** Визначено критерії вибору раціональної фасадної системи. Проаналізовано стан питання вибору та застосовності сучасних фасадних систем для нового будівництва та капітального ремонту на території України. На основі визначених факторів, які впливають на вибір найбільш раціональної фасадної системи багатоповерхової житлової або громадської будівлі, сформовано зручний та об'єктивний алгоритм вибору фасадної системи з урахуванням основних особливостей об'єкта будівництва, а також параметрів експлуатації. Цей алгоритм адаптовано до практичного застосування. **Результати.** Установлено вплив значень параметрів вибору фасадної системи на процес улаштування, експлуатації та ремонту сучасної фасадної системи. Виконано успішну апробацію отриманого алгоритму вибору раціональної фасадної системи шляхом оцінки значень факторів впливу із залученням провідних проектних організацій м. Дніпро. Під час проходження відповідних алгоритмів на сумісних нарадах проектувальника, замовника та підрядника встановлено найбільш раціональні фасадні системи для конкретних будівельних об'єктів зі значною об'єктивністю вибору. Адаптивність алгоритму шляхом відкидання незначних чинників призводить до збільшення наочності процесу вибору фасадної системи. **Наукова новизна.** Установлено закономірність впливу ряду організаційно-технологічних та експлуатаційних чинників на процес вибору раціональної фасадної системи. Підвищено ефективність визначення відповідної системи для конкретних умов будівництва з урахуванням особливостей експлуатації та призначення будівлі. **Практична значимість.** Учасник будівництва шляхом проходження нескладного алгоритму має змогу наочно оцінити вплив організаційно-технологічних та експлуатаційних факторів на вибір раціональної фасадної системи та під час оцінювання придатних параметрів відповідних факторів визначити найбільш раціональну фасадну систему для конкретного об'єкта. Унаслідок суттєво знижується вартість експлуатації фасадної системи за оптимізації тривалості міжремонтних періодів та поліпшення умов роботи її складових.

Ключові слова: раціональна фасадна система; параметри впливу; алгоритм; учасники будівництва

Вступ

Сьогоднішній день важливим завданням експлуатації наявного фонду будівель та споруд є вчасне проведення реконструкції з метою поліпшення енергоефективності, архітектурно-естетичної привабливості, сприяння відповідності обліку будівель загальній концепції розвитку населених міст. Особливо актуальною ця проблема залишається для будівель транспортної інфраструктури. Оскільки основна частина таких об'єктів зведена протягом 60–80-х років ХХ сторіччя, теплоізолявальні якості фасадних систем не витримують сучасних задач щодо енергоефективності та теплозбереження.

Головним фактором, який впливає на енергоефективність будівель незалежно від їх призначення, є здатність огорожувальних конструкцій чинити опір процесу передачі теплової енергії крізь них. Згідно з вимогами нормативних документів, відповідні конструкції мають забезпечувати встановлений опір тепловтрат зі зменшенням теплопровідних включень, володіти значними пароізоляційними властивостями для скорочення можливості проникнення в огорожувальну конструкцію водяної пари із зовнішнього середовища та унеможливити накопичення вологи під час експлуатації. Використання однонаправлених парозахисних мембран призводить до ефективного відведення вологи, що поліпшує мікроклімат внутрішніх приміщень та підвищує експлуатаційні властивості.

В умовах гострої проблеми енергозбереження та заощадження ресурсів на створення мікроклімату приміщень, постає питання вибору раціональної фасадної системи об'єкта будівництва [4–6]. Наявні технологічні регламенти від сучасних виробників систем передбачають порівняння тільки за 2–3 параметрами (переважно за терміном експлуатації, вартістю, теплосмістю) без урахування ряду додаткових факторів, значення яких притаманні конкретним умовам будівництва [1–3, 7]. Тому важливим є об'єктивне порівняння кількох видів фасадних систем для зваженого вибору найбільш раціональної з них [8, 9, 11, 12].

Невирішеним залишається питання забезпечення надійної експлуатації фасадних систем за збереження енергоефективності огорожувальних конструкцій [10, 13–18].

Мета

Відповідно до викладеного, метою даної статті є формування алгоритму вибору раціональної фасадної системи для конкретного будівельного об'єкта з урахуванням кліматичних, організаційно-технологічних та експлуатаційних властивостей.

Методика

На підставі експертного оцінювання важливості чинників, що впливають на вибір раціональної фасадної системи, встановлено:

– найбільше значення мають чинники, що обумовлюють термін служби фасадної системи, вартість і трудомісткість її улаштування та тривалість міжремонтних періодів. Спостерігається зацікавленість учасників будівельного процесу в зменшенні тривалості виконання робіт та підвищенні термінів безвідмовної експлуатації, навіть шляхом збільшення вартості улаштування фасадної системи;

– менше значення мають взаємовиключні визначальні чинники, такі як розрізненість елементів фасаду, їх світлопрозорість, наявність «мокрих» процесів під час виконання робіт. Також експерти зацікавлені в підвищенні енергоефективності фасадної системи, зручності обстеження її поточного стану, а також можливості миття зовнішнього шару фасаду для підвищення естетичних властивостей та поліпшення умов експлуатації;

– найменше значення мають чинники, які забезпечують адаптацію конструкцій фасадної системи до зміни кліматичних факторів, а також повторного використання окремих елементів системи.

Оскільки серед факторів, притаманних різним фасадним системам, є як якісні, так і кількісні показники, у тому числі взаємовиключні, класичний алгоритм вибору типу блок-схеми є неефективним. Тому доцільним буде створення комплексної методики, яка шляхом проходження нескладного алгоритму визначить найбільш раціональну фасадну систему за сукупною кількістю показників.

Приклад алгоритму вибору раціональної фасадної системи наведено в табл. 1.

У ньому запропоновано таку послідовність дій із вибору раціональної фасадної системи для об'єкта будівництва:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

1. Оцінюють кожен чинник залежно від застосованості його значення до зовнішнього вигляду будівлі, умов виконання робіт та подальшої експлуатації об'єкта будівництва. При цьому найбільш раціональні значення чинників підкреслюють.

2. Обирають фасадну систему, колонка якої має найбільшу кількість позначок чинників. Саме ця фасадна система й буде найбільш раціональною для використання в конкретному проекті. У разі, якщо декілька фасадних систем мають однакове (близьке) число позначок, відкидаються невідповідні системи, після чого оцінку повторюють.

3. У разі відсутності в прогнозованій найбільш раціональній фасадній системі обраних взаємовиключних чинників оцінку повторюють з урахуванням цих чинників або ж приймають рішення щодо вибору відповідної системи.

4. Після вибору найбільш раціональної фасадної системи всі учасники будівництва виконують її оцінку на предмет збігу результатів та можливості застосування до конкретного об'єкта будівництва. Якщо результати не збігаються, виконують сумісну відкриту нараду з метою обґрунтування кожного з факторів вибору раціональних фасадних систем та знаходження

найбільш придатної до конкретних умов будівництва й експлуатації.

5. Учасники будівельного процесу розпочинають реалізацію обраної найбільш раціональної фасадної системи в об'єкт будівництва.

У цьому алгоритмі користувач послідовно підкреслює (або позначає іншим методом) значення факторів, яким має відповідати раціональна фасадна система об'єкта будівництва. У випадку, якщо декілька видів фасадних систем мають однакове значення фактора, підкреслюють усі варіанти. У другій частині алгоритму виділяють значення взаємовиключних показників. Після чого обирають фасадну систему з найбільшою кількістю обраних факторів.

Якщо вибір неоднозначний відносно взаємовиключних факторів, окремо розглядають кожен із них з метою однозначного вибору найбільш раціональної фасадної системи для конкретних умов і конкретного об'єкта будівництва.

Результати

Із метою аналізу результатів алгоритму виконаємо його тестове проходження. За приклад обираємо архітектурно-конструктивне рішення з такими параметрами:

Таблица 1

Алгоритм вибору раціональної фасадної системи

Table 1

Algorithm for choosing a rational facade system

Кількісні показники	Вартість 1 м ² фасаду, грн		
	700	1 500	8 000
	Трудомісткість улаштування 1 м ² фасадної системи, люд.год		
	10	4	1,6
	Термін служби фасадної системи, років		
	20	50	100
	Тривалість періоду між поточними ремонтами, років		
	5	20	30
	Тривалість періоду між капітальними ремонтами, років		
	15	30	50
	Питома трудомісткість та вартість капремонтів відносно нової системи		
	130 %	80 %	50 %

Продовження табл. 1
Continuation of Table 1

Якісні взаємовиключні показники	Наявність технологічних пауз на твердження матеріалів під час виконання робіт		
	Так	Ні	Ні
	Наявність «мокрих процесів» під час виконання зовнішніх робіт		
	Так	Ні	Ні
	Можливість візуального та інструментального обстеження елементів системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість повторного використання елементів системи під час ремонту		
	Ні	Так	Так
	Світлопрозорість системи		
	Ні	Ні	Так
	Можливість миття зовнішнього шару системи		
	Ні	Так	Так
	Розрізненість елементів фасадної системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість навішування обладнання, розташування кріпильних елементів		
	Ні	Так	Ні
Підвищення енергоефективності шляхом заміни модульних елементів			
Ні	Можливо	Так	
Можливість адаптації системи до нових чинників шляхом внесення незначних змін			
Ні	Так	Так	
Результуюча система			
	«Мокрий» фасад	Вентильований фасад	Скляний фасад

– багатоповерхова будівля громадського призначення, із цокольним та 10 типовими поверхами, на яких розташовані офісні приміщення;

- конструктивна система – стінова, з несучими поздовжніми стінами із силікатної цегли;
- перекриття – збірні, із пустотних залізобетонних плит безперервного формування;
- альтернативною каркасною системою може бути монолітний залізобетонний каркас із заповненням стінами з газобетону товщиною 400 мм;

– будівля розташована в місті Дніпро. Оскільки товщина стін складає 380 або 510 мм, із внутрішнім шаром штукатурки, розрахункова товщина утеплювача (мінераловатні плити) становить 90 мм.

Необхідно визначити раціональну фасадну систему. Визначення будемо виконувати шляхом проходження алгоритму (табл. 2), система має задовольняти таким вимогам:

Таблиця 2

Заповнення алгоритму вибору раціональної фасадної системи

Table 2

Filling the algorithm for choosing a rational facade system

Кількісні показники	Трудомісткість улаштування 1 м ² фасадної системи, люд.год		
	10	4	1,6
	Термін служби фасадної системи, років		
	20	50	100
	Тривалість періоду між поточними ремонтами, років		
	5	20	30
	Тривалість періоду між капітальними ремонтами, років		
	15	30	50
	Питома трудомісткість та вартість капремонтів відносно нової системи		
130 %	80 %	50 %	
Якісні взаємовиключні показники	Наявність технологічних пауз на твердження матеріалів під час виконання робіт		
	Так	Ні	Ні
	Наявність «мокрих процесів» під час виконання зовнішніх робіт		
	Так	Ні	Ні
	Можливість візуального та інструментального обстеження елементів системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість повторного використання елементів системи під час ремонту		
	Ні	Так	Так
	Світлопрозорість системи		
	Ні	Ні	Так
	Можливість миття зовнішнього шару системи		
	Ні	Так	Так
	Розрізненість елементів фасадної системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість навішування обладнання, розташування кріпильних елементів		
Ні	Так	Ні	
Можливість адаптації системи до нових чинників шляхом внесення незначних змін до конструкції			
Ні	Так	Так	
Результуюча система			
«Мокрий» фасад	Вентилюваний фасад	Скляний фасад	

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- розрахунковий термін служби має складати не менше 50 років;
- тривалість міжремонтного періоду має бути максимальною;
- трудомісткість улаштування фасадної системи має складати не більше 8 люд.год/м², із метою максимального прискорення термінів улаштування системи та, відповідно, будівлі в цілому;
- вартість ремонту має бути мінімальною для оптимізації витрат на утримання фасаду;
- необхідна можливість простого та ефективного контролю поточного стану складових фасадної системи, вимір ефективності роботи всіх елементів, включаючи теплоізоляційні властивості та рівень вологості. Причому фасадна система має відводити вологу з середини приміщень для підтримання оптимального мікроклімату;
- світлопрозорість системи фасаду не має вирішального значення;
- з огляду на особливості експлуатації (великий потік людей біля будівлі, експлуатація прибудинкової території тощо) необхідно забезпечити розрізненість елементів фасаду та можливість повторного використання його елементів під час поточних і капітальних ремонтів для мінімізації вартості ремонтних робіт;
- фасадна система повинна забезпечувати можливість монтажу устаткування (зовнішні блоки кондиціонерів);
- під час капітального ремонту необхідно забезпечити повну заміну утеплювача, мембран, можливо, на нові більш ефективні та довговічні елементи.

Очевидно, що на етапі вибору значень факторів найбільш раціональною здавалась система скляного фасаду. Проте значення фактора «вартість улаштування 1 м² фасаду» перевищує вимоги замовника. Крім того, замовнику в цьому прикладі потрібна непрозора фасадна система. Оскільки можливо було зменшити міжремонтні періоди та загальний термін експлуатації фасадної системи, з урахуванням доцільної вартості улаштування 1 500 грн/м² обрано найбільш раціональну фасадну систему для конкретного об'єкта – фасадну систему з вентиляльованим повітряним прошарком, так звану систему «вентилюваний фасад». Більш дешева на етапі улаштування система типу «мокрый фасад» хоча й призводить до першочергового заощадження

коштів, потребує більших працевитрат. Крім того, у подальшій експлуатації її утримання дорожче у зв'язку зі збільшенням термінів ремонту, зменшення загальної довговічності та тривалості міжремонтних періодів. Тому ця система не є ефективною для конкретних умов будівництва.

Апробація розробок під час проектування багатопверхових житлових та громадських будівель відбувалась протягом 2018–2020 рр. у практичній діяльності ТОВ «Архітектурне бюро «Алюр», ТОВ «Омега–СКС» та ТОВ «ОМЕГА АРХИТЕКЧЕРАЛ БЮРО».

Діяльність цих організацій полягає в проектуванні переважно багатопверхових будівель та багатфункціональних комплексів громадсько-житлового призначення на території України. Відповідно, часто постає питання вибору раціональної фасадної системи для багатопверхових будівель.

Оскільки вказані вище організації виконують переважну більшість проектів для приватних замовників, деякі з проектних рішень, зокрема вартість проектних робіт, вартість деяких елементів будівлі (у тому числі й вартість фасадних систем), а також конкретні рішення фасадних систем складають комерційну таємницю. Тому алгоритм вибору раціональної фасадної системи з табл. 2 на наступних прикладах буде змінено.

1. У ТОВ «Архітектурне бюро «Алюр» запровадження алгоритму вибору раціональної фасадної системи наочно видно з проекту «Нове будівництво багатоквартирного житлового будинку в районі вул. Херсонської – вул. Костомарівської – пров. Ушинського – просп. Пушкіна, м. Дніпро». Цей проект має на меті забудову наявної ділянки з частковим використанням залишків монолітного залізобетонного каркасу багатопверхової будівлі поблизу пішохідної частини бульв. Кучеревського в м. Дніпро. Об'ємно-планувальні рішення передбачають розміщення житлового будинку з вбудовано-прибудованими нежитловими приміщеннями, а саме чотири 12-поверхові секції, прибудовані двоповерхові нежитлові приміщення та дворівневий паркінг. Проектні роботи виконано протягом 2020 року.

На нараді із замовником було встановлено такі вимоги до фасадної системи, крім теплотехнічних вимог згідно з нормативними документами:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

– термін служби фасадної системи не менше 50 років; максимальна тривалість міжремонтних періодів для поліпшення експлуатації системи;

– мінімальна трудомісткість улаштування фасадної системи для скорочення термінів виконання робіт;

– обов’язкова можливість миття зовнішнього шару фасаду для поліпшення естетичного сприйняття та архітектурної виразності будівлі під час експлуатації;

– розрізненість елементів фасаду для швидкого ремонту в разі пошкодження;

– можливість розташування кріпильних елементів у середині фасадної системи з метою навішування обладнання для кондиціонування тощо.

– світлопрозорість фасадної системи не потрібна.

Найбільшу кількість обраних факторів (табл. 3) отримала фасадна система з вентиляльованим повітряним прошарком. У результаті сумісних рішень обрано комплексну систему фасадної теплоізоляції з негорючим утеплювачем – мінераловатними плитами, з індустріальним опорядженням та вентиляльованим повітряним прошарком. Теплоізоляційний шар системи передбачено влаштовувати з мінераловатних плит «ТЕХНО» марки «ТЕХНОВЕНТ ЕКСТРА СП» товщиною 100 мм для керамічних блоків та 150 мм для залізобетону густиною 80 кг/м³. Індустріальне опорядження фасаду – керамогранітні плити.

Таблица 3

Заповнений алгоритм вибору раціональної фасадної системи під час апробації в ТОВ «Архітектурне бюро «Алюр»»

Table 3

Filled out algorithm for choosing a rational facade system during testing in Architectural Bureau Allure LLC

Кількісні показники	Вартість 1 м ² фасаду, грн		
	700	1 500	8 000
	Трудомісткість улаштування 1 м ² фасадної системи, люд.год		
	10	4	1,6
	Термін служби фасадної системи, років		
	20	50	100
	Тривалість періоду між поточними ремонтами, років		
	5	20	30
	Тривалість періоду між капітальними ремонтами, років		
	15	30	50
	Питома трудомісткість та вартість капремонтів відносно нової системи		
	130 %	80 %	50 %
Якісні взаємо-виключні показники	Наявність технологічних пауз на твердження матеріалів під час виконання робіт		
	Так	Ні	Ні
	Наявність «мокрих процесів» під час виконання зовнішніх робіт		
Так	Ні	Ні	

Продовження табл. 3
Continuation of Table 3

Якісні взаємовиключні показники	Можливість візуального та інструментального обстеження елементів системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість повторного використання елементів системи під час ремонту		
	Ні	Так	Так
	Світлопрозорість системи		
	Ні	Ні	Так
	Можливість миття зовнішнього шару системи		
	Ні	Так	Так
	Розрізненість елементів фасадної системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість навішування обладнання, розташування кріпильних елементів		
	Ні	Так	Ні
	Підвищення енергоефективності шляхом заміни модульних елементів		
	Ні	Можливо	Так
Можливість адаптації системи до нових чинників шляхом внесення незначних змін до конструкції			
Ні	Так	Так	
Результуюча система			
	«Мокрий» фасад	Вентильований фасад	Скляний фасад

2. У ТОВ «Омега–СКС» упровадження алгоритму вибору раціональної фасадної системи видно з проекту «Будівництво житлового комплексу з вбудовано-прибудованими приміщеннями та підземним паркінгом по вул. Антона Цедіка, 14а, у Шевченківському районі м. Києва». Будівля являє собою 3 житлових секції 16 та 9 поверхів, які з'єднані 2-поверховими прибудованими приміщеннями комерційного призначення, а також передбачений однорівневий підземний паркінг. Будівля має бути виконана в монолітному залізобетонному каркасі із заповненням керамічною цеглою. Проектні роботи виконано протягом 2020 року.

На сумісній нараді проектувальником та замовник заповнили бланк алгоритму вибору раціональної фасадної системи (табл. 4) за такими вимогами:

- термін служби фасадної системи не менше 50 років; максимальна тривалість міжремонтних періодів для поліпшення експлуатації системи;
- мінімальна трудомісткість улаштування фасадної системи для скорочення термінів виконання робіт;
- обов'язкова можливість миття зовнішнього шару фасаду для поліпшення естетичного сприйняття та архітектурної виразності будівлі під час експлуатації;
- розрізненість елементів фасаду для швидкого ремонту в разі пошкодження;
- світлопрозорість фасадної системи не потрібна, проте необхідно забезпечити стикування фасадної системи з елементами панорамного застакління будівлі.

Таблиця 4

**Заповнений алгоритм вибору раціональної фасадної системи
під час апробації в ТОВ «Омега–СКС»**

Table 4

Filled out algorithm for choosing a rational facade system during testing in Omega-SKS LLC

Кількісні показники	Трудомісткість улаштування 1 м ² фасадної системи, люд.год		
	10	4	1,6
	Термін служби фасадної системи, років		
	20	50	100
	Тривалість періоду між поточними ремонтами, років		
	5	20	30
	Тривалість періоду між капітальними ремонтами, років		
	15	30	50
	Питома трудомісткість та вартість капремонтів відносно нової системи		
130 %	80 %	50 %	
Якісні взаємовиключні показники	Наявність технологічних пауз на твердження матеріалів під час виконання робіт		
	Так	Ні	Ні
	Наявність «мокрих процесів» під час виконання зовнішніх робіт		
	Так	Ні	Ні
	Можливість візуального та інструментального обстеження елементів системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість повторного використання елементів системи під час ремонту		
	Ні	Так	Так
	Світлопрозорість системи		
	Ні	Ні	Так
	Можливість миття зовнішнього шару системи		
	Ні	Так	Так
	Розрізненість елементів фасадної системи		
	Ні	Так	Так
Можливість навішування обладнання, розташування кріпильних елементів			
Ні	Так	Ні	
Результуюча система			
«Мокрий» фасад	Вентилюваний фасад	Скляний фасад	

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Найбільшу кількість обраних факторів отримала фасадна система з вентиляльованим повітряним прошарком. У результаті сумісних рішень обрано комплексну систему фасадної теплоізоляції з негорючим утеплювачем – мінераловатними плитами, з індустріальним опорядженням та вентиляльованим повітряним прошарком. Теплоізоляційний шар системи передбачено влаштувати з мінераловатних плит «ТЕХНО» марки «ТЕХНОВЕНТ ЕКСТРА СП» товщиною 100 мм для керамічних блоків та 150 мм для залізобетону густиною 80 кг/м³. Опорядження фасаду – керамогранітні плити.

Найбільшу кількість обраних факторів отримали фасадна система з вентиляльованим повітряним прошарком та система скляного фасаду. Проте через наявність взаємовиключних факторів (відсутність прозорості фасадної системи) під час сумісної наради із замовником було вирішено зупинитись на системі вентиляльованого фасаду. У результаті обрано таку систему фасаду:

- повнотіла керамічна цегла марки 100 на цементно-піщаному розчині марки М100, примикання цегляної кладки до залізобетонних конструкцій здійснюється через демпферну стрічку зі спіненого поліетилену товщиною 10 мм;
- шар із мінеральною плитою NG, 45 кг – 50 мм;
- шар мінеральної плити NG, 80 кг – 50 мм;
- повітряний прошарок – 50 мм;
- керамограніт – 10 мм.

3. У ТОВ «ОМЕГА АРХИТЕКЧЕРАЛ БЮРО» впровадження алгоритму вибору раціональної фасадної системи видно з проекту «Реконструкція магазину (літ. Д) під адміністративну будівлю за адресою: вул. Теліги Олени, 4, у Шевченківському районі м. Київ». Проектом передбачено знесення наявних будівель на майданчику забудови, розробку котловану під захистом шпунтового огородження та зведення нової офісної будівлі. Будівля являє собою прямокутний у плані адміністративний будинок зі стилізованим та підземним паркінгом. На першому поверсі знаходяться вестибюль та офісні приміщення. На 2–8-му поверхах – офісні приміщення.

На нараді з замовником було встановлено такі вимоги до фасадної системи, крім теплоте-

хнічних вимог згідно з нормативними документами:

- термін служби фасадної системи не менше 100 років; максимальна тривалість міжремонтних періодів для поліпшення експлуатації системи;
- мінімальна трудомісткість улаштування фасадної системи для скорочення термінів виконання робіт;
- обов'язкова можливість миття зовнішнього шару фасаду для поліпшення естетичного сприйняття та архітектурної виразності будівлі під час експлуатації;
- обов'язкова прозорість фасадної системи для забезпечення максимальної архітектурної виразності офісної будівлі;
- розрізненість елементів фасаду для швидкого ремонту в разі пошкодження.

За цими вимогами на сумісній нараді проєктувальник та замовник заповнили бланк алгоритму вибору фасадної системи (табл. 5).

У результаті обрано сучасну систему панорамного фасадного скління. Значна тривалість міжремонтних періодів, а також застосування сучасних енергоефективних склопакетів призводить до значного заощадження коштів, що компенсує підвищені витрати на улаштування системи.

Наукова новизна та практична значимість

Установлено закономірність впливу ряду організаційно-технологічних та експлуатаційних чинників на процес вибору раціональної фасадної системи. Підвищено ефективність визначення відповідної системи для конкретних умов будівництва з урахуванням особливостей експлуатації та призначення будівлі.

Учасник будівництва шляхом проходження нескладного алгоритму має змогу наочно оцінити вплив організаційно-технологічних та експлуатаційних факторів на вибір раціональної фасадної системи. Під час оцінювання придатних параметрів відповідних факторів визначають найбільш раціональну фасадну систему для конкретного об'єкта. Унаслідок суттєво знижується вартість експлуатації фасадної системи за оптимізації тривалості міжремонтних періодів та поліпшення умов роботи її складових.

Таблиця 5

**Заповнений алгоритм вибору раціональної фасадної системи під час апробації
в ТОВ «ОМЕГА АРХИТЕКТУРАЛ БЮРО»**

Table 5

**Filled out algorithm for choosing a rational facade system during testing
in OMEGA ARCHITECTURAL BUREAU LLC**

Кількісні показники	Трудомісткість улаштування 1 м ² фасадної системи, люд.год		
	10	4	1,6
	Термін служби фасадної системи, років		
	20	50	100
	Тривалість періоду між поточними ремонтами, років		
	5	20	30
	Тривалість періоду між капітальними ремонтами, років		
	15	30	50
	Питома трудомісткість та вартість капремонтів відносно нової системи		
130 %	80 %	50 %	
Якісні взаємовиключні показники	Наявність технологічних пауз на твердження матеріалів під час виконання робіт		
	Так	Ні	Ні
	Наявність «мокрих процесів» під час виконання зовнішніх робіт		
	Так	Ні	Ні
	Можливість візуального та інструментального обстеження елементів системи		
	Ні	Так	Так
	Можливість повторного використання елементів системи під час ремонту		
	Ні	Так	Так
	Світлопрозорість системи		
	Ні	Ні	Так
	Можливість миття зовнішнього шару системи		
	Ні	Так	Так
	Розрізненість елементів фасадної системи		
	Ні	Так	Так
Можливість навішування обладнання, розташування кріпильних елементів			
Ні	Так	Ні	
Результуюча система			
«Мокрий» фасад	Вентилюваний фасад	Скляний фасад	

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Висновки

Таким чином, розроблена методика вибору раціональної фасадної системи шляхом проходження нескладного алгоритму дає змогу будь-якому учаснику будівельного процесу підібрати найбільш раціональну систему фасаду для конк-

ретного об'єкта будівництва з урахуванням особливостей експлуатації, місцевих кліматичних та організаційно-технологічних умов, і як наслідок – заощадити кошти за рахунок найбільш доцільного підбору термінів виконання ремонтних робіт і тривалості міжремонтних періодів, які можуть мати вирішальний вплив на експлуатацію фасадної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гагарин В. Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК)*. 2007. № 6. С. 82–90.
2. Галушко В. А., Ролитенко Ю. Е. Использование холодного склеивания как альтернатива механическому способу крепления кровельных материалов. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2006. № 9. С. 4–8.
3. *ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Настанова основи проектування конструкцій*. [Чинний від 2009-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с.
4. Емельянова В. А., Немова Д. В., Мифтахова Д. Р. Оптимизированная конструкция навесного вентилируемого фасада. *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 6 (50). С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.5862/mce.50.6>
5. Еноткина С. А. Эксплуатация многослойных ограждающих конструкций. *Молодой ученый*. 2011. № 6 (29). Т. 1. С. 49–52.
6. Радкевич А. В., Арутюнян І. А., Данкевич Н. О. Аналіз існуючих методів і моделей при обґрунтуванні організаційно-технологічних рішень будівництва об'єктів. 2017. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2017. Вип. 11. С. 74–80.
7. Радкевич А. В., Нетеса, К. Н. Проблематика современных фасадных систем многоэтажных жилых зданий. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. Вип. 61. С. 358–364.
8. Савйовский В. В. Безопасность и надежность эксплуатации современных зданий. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2011. № 11–12. С. 50–54.
9. Савйовский В. В., Джалалов М. Н., Савйовский А. В., Муляр А. Н. Энергоаудит и термомодернизация зданий. *Будівництво України*. 2010. № 6. С. 3–7.
10. Туснина О. А., Емельянов А. А., Туснина В. М. Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов. *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 8 (43). С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.5862/mce.43.8>
11. Block P., Schlueter A., Veenendaal D., Bakker J., Begle M., Hischer I., ... Lydon G. P. NEST HiLo : investigating lightweight construction and adaptive energy systems. *Journal of Building Engineering*. 2017. Vol. 12. P. 332–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2017.06.013>
12. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. Some thermal parameters influence on the energy performance of the ventilated walls. *Proceedings of 20th UIT National Heat Transfer Conference*. 2002. P. 357–362.
13. Falagan D. H. Towards a pragmatic architecture. The case of Tous & Fargas. *Research Journal*. 2017. Vol. 4. Iss. 2. P. 119–147. DOI: <https://doi.org/10.4995/vlc.2017.6952>
14. Figaszewski J., Sokolowska-Moskwiak J. The concept of multifunctional wall—an energy system integrated in a single wall. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2017. Vol. 10. Iss. 1. P. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.21307/acee-2017-001>
15. Gallo P., Romano R. Adaptive facades, developed with innovative nanomaterials, for a sustainable architecture in the Mediterranean area. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 180. P. 1274–1283. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.04.289](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.289)
16. Park S., Neizert T., Kim Y., Lee S. Properties of Lightweight Composites Using Industry Wastes with NaOH Alkaline Activator. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2017. Vol. 16. Iss. 3. P. 619–624. DOI: <https://doi.org/10.3130/jaabe.16.619>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

17. Pittau F., Malighetti L. E., Iannaccone G., Masera G. Prefabrication as large-scale efficient strategy for the energy retrofit of the housing stock : An Italian case study. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 180. P. 1160–1169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.276>
18. Radkevych A. V., Netesa K. M. Aspects definition of reliability evaluation facade systems from the view point of Eurocode. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 4 (58). P. 205–212. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49287>

А. В. РАДКЕВИЧ¹, Т. В. ТКАЧ², К. Н. НЕТЕСА^{3*}

¹Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 02, эл. почта anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

²Каф. «Планирование и организация строительства», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (096) 231 35 79, эл. почта taisiatkach@gmail.com, ORCID 0000-0002-9433-7514

^{3*}Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, +38 (095) 062 60 09, эл. почта netesakostia@meta.ua, ORCID 0000-0002-4087-5552

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЫ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

Цель. В качестве основной цели авторы предусматривают сформировать алгоритм выбора рациональной фасадной системы для конкретного строительного объекта с учетом климатических, организационно-технологических и эксплуатационных свойств, который может быть применен любым участником строительного процесса. **Методика.** Определены критерии выбора рациональной фасадной системы. Проведен анализ состояния вопроса выбора и применимости современных фасадных систем для нового строительства и капитального ремонта на территории Украины. На основе определенных факторов, влияющих на выбор наиболее рациональной фасадной системы многоэтажного жилого или общественного здания, сформирован удобный и объективный алгоритм выбора фасадной системы с учетом основных особенностей объекта строительства, а также параметров эксплуатации. Данный алгоритм адаптирован к практическому применению. **Результаты.** Установлено влияние значений параметров выбора фасадной системы на процесс устройства, эксплуатации и ремонта современной фасадной системы. Выполнена успешная апробация полученного алгоритма выбора рациональной фасадной системы путем оценки значений факторов влияния с привлечением ведущих проектных организаций г. Днепро. При прохождении соответствующих алгоритмов на совместных совещаниях проектировщика, заказчика и подрядчика установлены наиболее рациональные фасадные системы для конкретных строительных объектов со значительной объективностью выбора. Адаптивность алгоритма путем отбрасывания незначительных факторов приводит к увеличению наглядности процесса выбора фасадной системы. **Научная новизна.** Установлена закономерность влияния ряда организационно-технологических и эксплуатационных факторов на процесс выбора рациональной фасадной системы. Повышена эффективность определения соответствующей системы для конкретных условий строительства с учетом особенностей эксплуатации и назначения здания. **Практическая значимость.** Участник строительства путем прохождения несложного алгоритма имеет возможность наглядно оценить влияние организационно-технологических и эксплуатационных факторов на выбор рациональной фасадной системы и при оценивании параметров соответствующих факторов определить наиболее рациональную фасадную систему для конкретного объекта. Вследствие существенно снижается стоимость эксплуатации фасадной системы при оптимизации продолжительности межремонтных периодов и улучшения условий работы ее составляющих.

Ключевые слова: рациональная фасадная система; параметры влияния; алгоритм; участники строительства

A. V. RADKEVYCH¹, T. V. TKACH², K. M. NETESA^{3*}

¹Dep. «Construction Operation and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 02, e-mail anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

²Dep. «Construction Planning and Organization», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 231 35 79, e-mail taisiatkach@gmail.com, ORCID 0000-0002-9433-7514

^{3*}Dep. «Construction Operation and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38(095) 062 60 09, e-mail netesakostia@meta.ua, ORCID 0000-0002-4087-5552

DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR CHOOSING A RATIONAL FACADE SYSTEM OF MULTI-STOUREY BUILDINGS

Purpose. The authors aimed to form an algorithm for choosing a rational facade system for a specific construction site, taking into account climatic, organizational-technological and operational properties, applicable to use by any participant in the construction process. **Methodology.** The criteria for choosing a rational facade system were determined. The state of choosing and applicability of modern facade systems for new construction and overhaul in Ukraine was analyzed. Based on certain factors influencing the choice of the most rational facade system of a multi-storey residential or public building the authors formed a convenient and objective algorithm for choosing a facade system, taking into account the main features of the construction object, as well as operating parameters. The algorithm was adapted to practical application. **Findings.** The influence of the parameters of choosing facade system on the process of arrangement, operation and repair of the modern facade system is established. The obtained algorithm for choosing a rational facade system by an estimation of values of influence factors in activity of the leading design organizations of Dnipro was successfully tested. By passing the appropriate algorithms at the joint meetings of the designer, customer and contractor, the most rational facade systems were found for specific construction projects with significant objectivity of choice. The adaptability of the algorithm by discarding minor factors leads to increased visibility of the process of choosing a facade system. **Originality.** The regularity of the influence of a number of organizational-technological and operational factors on the process of choosing a rational facade system is established. The efficiency of determining the appropriate system for specific construction conditions has been increased, taking into account the peculiarities of operation and purpose of the building. **Practical value.** The participant of construction by passing a simple algorithm has the opportunity to clearly assess the influence of organizational, technological and operational factors on the choice of a rational facade system. By evaluating the parameters of the corresponding factors, the most rational facade system for a particular object was determined. As a result, the cost of operation of the facade system is significantly reduced while optimizing the duration of repair periods and improving the working conditions of the components of the facade system.

Keywords: facade system; parameters of influence; algorithm; construction participants

REFERENCES

1. Gagarin, V. G. (2007). Teploizolyatsionnye fasady s tonkim shtukaturnym sloem. *Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics*, 6, 82-90. (in Russian)
2. Galushko, V., & Rolitienko, Y. (2016). The use of cold bonding as an alternative to mechanical fastening method of roofing materials. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 9, 4-8. (in Russian)
3. *Nastanova osnovy proektuvannia konstruktsiim, 81 DSTU-N B V.1.2-13:2008* (2009). (in Ukrainian)
4. Emelianova, V. A., Nemova, N. D., & Miftakhova, D. R. (2014). Optimized structure of ventilated facades. *Magazine of Civil Engineering*, 6(50), 53-66. DOI: <https://doi.org/10.5862/mce.50.6> (in Russian)
5. Yenotkina, S. A. (2011). Ekspluatatsiya mnogosloynnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy. *Young Scientist*, 6((29)1), 49-52. (in Russian)
6. Radkevich, A. V., Arutyunyan, I. A., & Dankevich, N. O. (2017). Analysis of existing methods and models when rationale of organizational-technological solutions of construction objects. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 11, 74-80. (in Ukrainian)
7. Radkevich, A. V., & Netesa, K. N. Problematika sovremennykh fasadnykh sistem mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy. *Bulletin of Odessa state academy of civil engineering and architecture*, 61, 358-364. (in Russian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. Savyovskiy, V. V. (2011). Bezopasnost i nadezhnost ekspluatatsii sovremennykh zdaniy. *Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 11-12, 50-54. (in Russian)
9. Savyovskiy, V. V., Dzhalalov, M. N., Savyovskiy, A. V., & Mulyar, A. N. (2010). Energoaudit i termomodernizatsiya zdaniy. *Budivnytstvo Ukrainy*, 6, 3-7. (in Russian)
10. Tushina, O. A., Emelianov, A. A., & Tushina, V. M. (2013). Thermal insulation properties of various ventilated facade systems. *Magazine of Civil Engineering*, 8(43), 54-63. DOI: <https://doi.org/10.5862/mce.43.8> (in Russian)
11. Block, P., Schlueter, A., Veenendaal, D., Bakker, J., Begle, M., Hischier, I., ... Lydon, G. P. (2017). NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems. *Journal of Building Engineering*, 12, 332-341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.06.013> (in English)
12. Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2002). Some thermal parameters influence on the energy performance of the ventilated walls. In *Proceedings of 20th UIT National Heat Transfer Conference* (pp. 357-362), Maratea, Italy. (in Italian)
13. Falagan, D. H. (2017). Towards a pragmatic architecture. The case of Tous & Fargas. *Research Journal*, 4(2), 119-147. DOI: <https://doi.org/10.4995/vlc.2017.6952> (in English)
14. Figaszewski, J., & Sokołowska-Moskwiak, J. (2017). The concept of multifunctional wall - an energy system integrated in a single wall. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 10(1), 5-10. DOI: <https://doi.org/10.21307/acee-2017-001> (in English)
15. Gallo, P., & Romano, R. (2017). Adaptive Facades, Developed with Innovative Nanomaterials, for a Sustainable Architecture in the Mediterranean Area. *Procedia Engineering*, 180, 1274-1283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.289> (in English)
16. Park, S., Neizert, T., Kim, Y., & Lee, S. (2017). Properties of Lightweight Composites Using Industry Wastes with NaOH Alkaline Activator. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(3), 619-624. DOI: <https://doi.org/10.3130/jaabe.16.619> (in English)
17. Pittau, F., Malighetti, L. E., Iannaccone, G., & Maserà, G. (2017). Prefabrication as Large-scale Efficient Strategy for the Energy Retrofit of the Housing Stock: An Italian Case Study. *Procedia Engineering*, 180, 1160-1169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.276> (in English)
18. Radkevych, A. V., & Netesa, K. M. (2015). Aspects definition of reliability evaluation facade systems from the view point of eurocode. *Science and Transport Progress*, 4(58), 205-212. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49287> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.08.2020

Прийнята до друку: 11.12.2020

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.131.543:517.9

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, Д. Ю. ІГНАТЕНКО²

^{1*}Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, ел. пошта ihnatenkodmytro@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬ НА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛАХ

Мета. У статті передбачено розробити метод визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечних схилах. **Методика.** Для досягнення поставленої мети автори виконали порівняльні розрахунки скінченно-елементних моделей зсувонебезпечного шаруватого схилу з влаштуванням підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль: вертикальних, розташованих під кутом до вертикальної осі, об'єднаних бетонним ростверком, без ростверку, різного діаметру, із різною відстанню між палями, але однакової довжини, що обумовлена розташуванням визначеної за попередніми розрахунками поверхні ковзання. **Результати.** За результатами розрахунків контактної задачі взаємодії ґрунтового масиву та підпірної конструкції було отримано закономірності формування міцності та стійкості зсувонебезпечного укріпленого схилу, що дає можливість прогнозування його геомеханічної стійкості залежно від можливого розташування кривої поверхні ковзання. Обґрунтовано спосіб підвищення коефіцієнта стійкості ґрунтового схилу залежно від варіації параметрів ґрунтоцементної підпірної пальової конструкції. Чисельними розрахунками обґрунтовано параметри ґрунтоцементних пальових підпірних конструкцій – довжину паль, діаметр паль, відстань між палями, кут їх нахилу та доцільність об'єднання паль бетонним ростверком. **Наукова новизна.** Уперше отримано закономірності формування міцності та стійкості ґрунтоцементної підпірної конструкції для укріплення зсувонебезпечних схилів, що дає можливість прогнозування їх геомеханічної стійкості залежно від можливого розташування кривої поверхні ковзання. Також уперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності, стійкості та напружень за Мізесом в елементах підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує. Набули подальшого розвитку методи оцінки та прогнозування зсувонебезпечності ґрунтових схилів, що дозволило обґрунтувати спосіб підвищення коефіцієнта запасу стійкості залежно від варіації параметрів ґрунтоцементної підпірної конструкції. Уперше обґрунтовано параметри способу підвищення стійкості зсувонебезпечного схилу з пальовими підпірними конструкціями на основі комплексного математичного та відцентрового моделювання з використанням реальних ґрунтів зсувонебезпечного схилу та критеріїв подібності. **Практична значимість.** Автори розробили та запатентували метод укріплення зсувонебезпечних схилів за допомогою ґрунтоцементних паль, об'єднаних бетонним ростверком та розташованих перпендикулярно до вектора руху тіла зсуву.

Ключові слова: ґрунтоцементні палі; бетонний ростверк; скінченно-елементне моделювання; зсувонебезпечний схил; коефіцієнт стійкості схилу

Вступ

В роботах відомих науковців доведено вплив природно-кліматичних чинників на виникнення зсувів природного та техногенного походження, досліджено дію технології виготовлення ґрунтоцементних паль і зміни рівня ґрунтових вод на стійкість ґрунтових схилів, зокрема їх армування [1, 5, 6]. У наш час порядок

розрахунку ґрунтоцементних паль як підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах не регламентовано жодними державними будівельними нормами України. Саме тому необхідно дослідження зосередити саме на методах розрахунку таких підпірних конструкцій.

Із великої кількості наявних методів укріплення ґрунтів найбільш ефективним можна вважати метод бурозмішувальної цементациї,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

або jet-grouting [2–4, 10]. Грунтоцементні палі є економічно вигідним варіантом укріплення зсувонебезпечного схилу, і вони мають велику кількість переваг для застосування саме на зсувонебезпечних схилах порівняно з іншими типами укріплення.

У ході роботи було визначено, яким чином необхідно розраховувати несучу здатність грунтоцементних паль. Було також визначено параметри підпірної конструкції, за якими наведено обґрунтування, а саме: діаметр, відстань між палями, їх довжину, кут нахилу та можливість або об'єднання паль бетонним ростверком. Результати досліджень із цієї теми представлені в наукових публікаціях [4, 7–9].

Мета

У статті передбачено обґрунтувати параметри грунтоцементної пальової підпірної конструкції на основі результатів аналітичних та експериментальних досліджень стійкості зсувонебезпечного шаруватого схилу, а також визначити раціональні параметри цієї конструкції шляхом розв'язання контактної задачі взаємодії ґрунтового масиву та підпірних елементів.

Методика

Автори статті розробили методику визначення раціональних параметрів підпірної конструкції з грунтоцементних паль, в основі якої лежить аналіз і порівняння результатів розрахунку моделей шаруватого ґрунтового схилу,

складеного суглинистими ґрунтами, виконаного за допомогою методу скінченно-елементного моделювання в сучасних програмних комплексах.

На першому етапі розрахунку параметрів підпірної конструкції з грунтоцементних паль необхідно визначити найбільш небезпечну форму та місце розташування кривої поверхні ковзання тіла зсуву, згідно з якою коефіцієнт стійкості зсувонебезпечного схилу буде мінімальним [11]. Визначення мінімального коефіцієнта стійкості схилу є найбільш важливим етапом для подальшого розрахунку міцності підпірної конструкції з грунтоцементних паль. Не менш важливим є також вибір місця розташування грунтоцементних паль. Запропонований метод – це новий погляд і підхід у проектуванні конструкцій такого типу. Новим рішенням є саме комплексний розрахунок, який можна структурувати в такій послідовності:

- визначення найбільш небезпечного місця розташування кривої поверхні ковзання тіла зсуву;
- визначення місця розташування підпірної конструкції з грунтоцементних паль;
- визначення згинального моменту, що діє на одну палю;
- розрахунок контактної задачі взаємодії ґрунтового схилу та підпірної конструкції за допомогою скінченно-елементного моделювання (рис. 1).

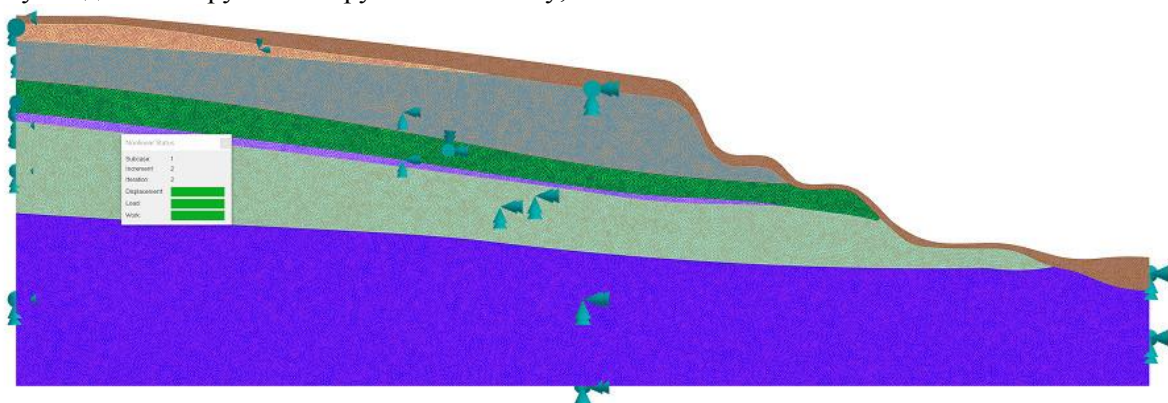


Рис. 1. Скінченно-елементна модель зсувонебезпечного схилу в програмному комплексі «Autodesk Inventor Nastran»

Fig. 1. Finite-element model of landslide-prone slope in Autodesk Inventor Nastran software package

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

На останньому етапі розрахунку для визначення раціональних параметрів необхідно змінювати вихідні дані задачі, а саме діаметр паль, їх довжину, кут нахилу відносно вертикальної осі, відстань між палями, а також параметри бетонного ростверку, що об'єднує пальі.

Від зміни параметрів фізико-механічних до геометричних існує велика кількість та обсяг проміжних розрахунків, без яких, власне, порівняння ефективності роботи підпірної конструкції з різними параметрами взагалі неможливе. Для полегшення розрахунку контактної задачі взаємодії ґрунтового схилу та підпірної конструкції необхідно визначити параметри (вихідні дані задачі), зміна яких не є критично важливою і не впливає значною мірою на результати розрахунків. До таких параметрів можна віднести фізико-механічні властивості матеріалів – ґрунтоцементу, бетону та ґрунтів. Вони заздалегідь відомі і залежать в основному від фізико-механічних характеристик ґрунту, який зміцнюється в процесі виготовлення ґрунтоцементних паль. Міцність ґрунтоцементу складає близько 3...5 МПа.

Керуючись цими даними, можна визначити

фізико-механічні властивості ґрунтоцементу в кожному конкретному випадку, залежно від інженерно-геологічних умов для контактної задачі, а також залежно від технологічних параметрів виготовлення паль.

Необхідно також зазначити, що для розв'язання контактної задачі взаємодії ґрунтоцементних паль та ґрунтового шаруватого схилу за допомогою скінченно-елементного моделювання потрібна досить велика обчислювальна потужність комп'ютера. Кількість скінченних елементів у задачі такого типу може сягати понад 13 млн елементів. При цьому під час моделювання характеру нерівної поверхні паль, що не є ідеально гладким циліндром, контакт скінченних елементів ґрунту та скінченних елементів паль відтворений максимально точно й досягається саме великою деталізацією скінченно-елементної сітки з середнім розміром скінченних елементів 10 см.

Реалізація моделювання нелінійної роботи об'ємних скінченних елементів ґрунту можлива за допомогою програмного комплексу «Autodesk Inventor Nastran» (рис. 2) або «ЛІРА-САПР» у процесорі «Монтаж».

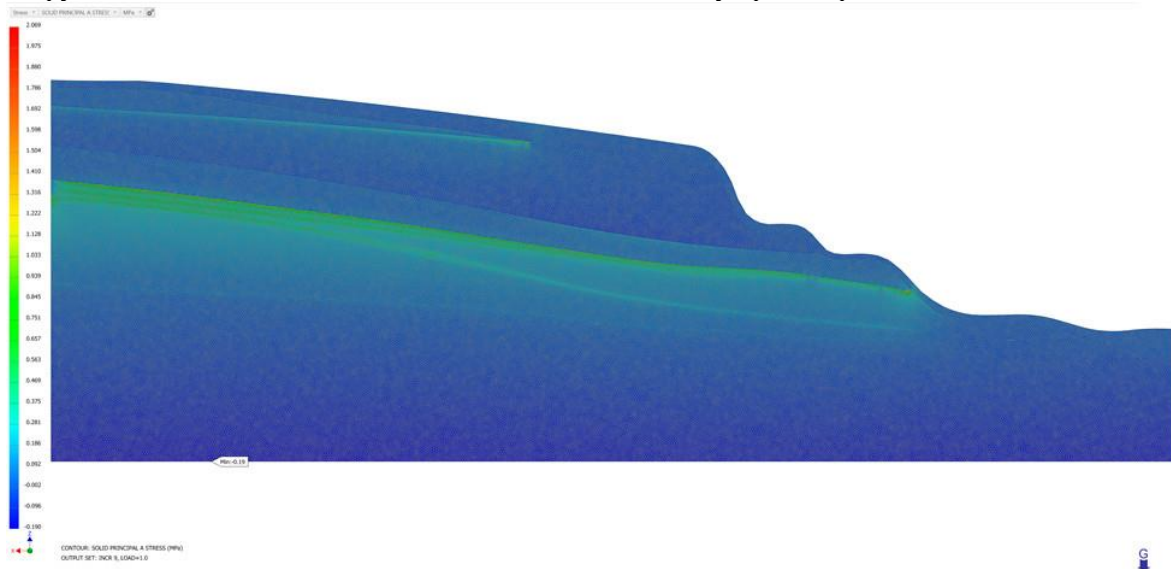


Рис. 2. Ізополя напружень у програмному комплексі «Autodesk Inventor Nastran»

Fig. 2. Stress isofields in Autodesk Inventor Nastran software package

Побудова графіків (залежностей), за якими можна оцінити ефективність роботи підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль, обробка та аналіз отриманих результатів розрахунків скін-

ченно-елементного моделювання контактної задачі взаємодії ґрунтового схилу, що підсилений ґрунтоцементними палями, можливі за допомогою програми Microsoft Excel.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Результати

Обсяг отриманих результатів повною мірою дозволяє провести аналіз та обґрунтування параметрів підірних конструкцій із ґрунтоцементних паль. Уперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності та стійкості, а також напружень за Мізесом в елементах підірних конструкцій із ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує. Розроблено та запатентовано метод укріплення зсувонебезпечних схилів за допомогою ґрунтоцементних паль, об'єднаних бетонним ростверком, розташованих перпендикулярно до вектора руху тіла зсуву [4, 11].

Отримані в ході розв'язання контактної задачі залежності параметрів ґрунтоцементної підірної конструкції з варіацією відстані між палями діаметром 1,2 м дозволяють для випадку зсувонебезпечного шаруватого схилу, складеного суглинистими ґрунтами з модулем пружності в діапазоні 20...30 МПа, отримати мінімальні значення переміщень та напружень за Мізесом, а також максимальне значення коефіцієнта стійкості.

За результатами розрахунків скінченно-елементних моделей було отримано залежності (рис. 3–6). Обґрунтування параметрів підірних конструкцій із ґрунтоцементних паль (діаметр ґрунтоцементних паль 1,2 м, відстань між палями в просвіті 0,6 м) та порівняння ефективності роботи підірної конструкції з різними параметрами виконано саме завдяки цим залежностям.

За результатами порівняльних розрахунків скінченно-елементних моделей шаруватого зсувонебезпечного схилу, підсиленого ґрунтоцементними палями, визначено, що за заданого діаметра ґрунтоцементних паль 1,2 м й наявності бетонного ростверку коефіцієнт запасу міцності підірної конструкції має мінімум, що дорівнює 1,7, при цьому відстань між палями дорівнює 0,6 м, що дозволяє проектувати досить надійні підірні конструкції такого типу (рис. 3).

Коефіцієнт запасу стійкості ґрунтового схилу, який підсилено ґрунтоцементними палями діаметром 1,2 м, що розташовані ортогонально до поверхні ковзання тіла зсуву, перебуває в ступеневій залежності від відстані між палями та за її величини, що дорівнює 0,6 м, становить 1,7, що забезпечує достатню стабільність зсувонебезпечного схилу.

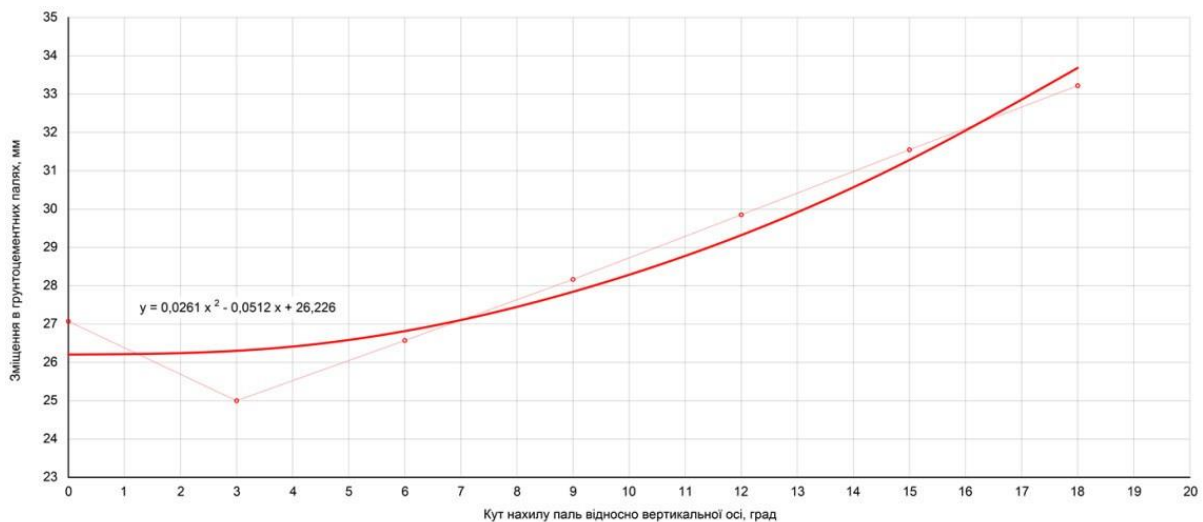


Рис. 3. Залежність зміщення в ґрунтоцементних палях від кута нахилу паль відносно вертикальної осі

Fig. 3. Dependence of displacement in soil-cement piles on the angle of inclination of piles relative to the vertical axis

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

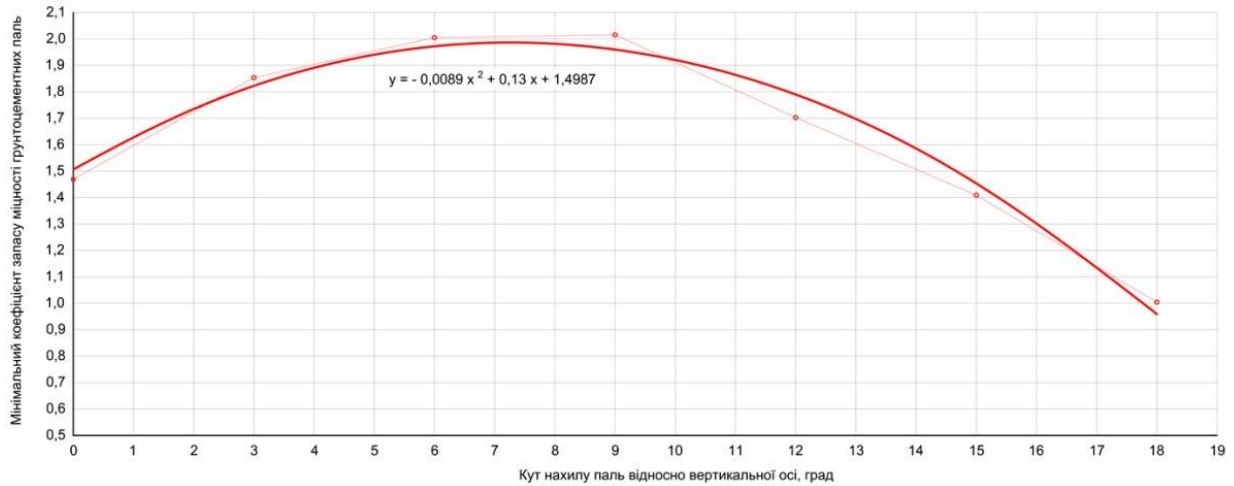


Рис. 4. Залежність мінімального коефіцієнта запасу міцності ґрунтоцементних палів від кута нахилу палів відносно вертикальної осі

Fig. 4. Dependence of the minimum strength coefficient of soil-cement piles on the angle of inclination of the piles relative to the vertical axis

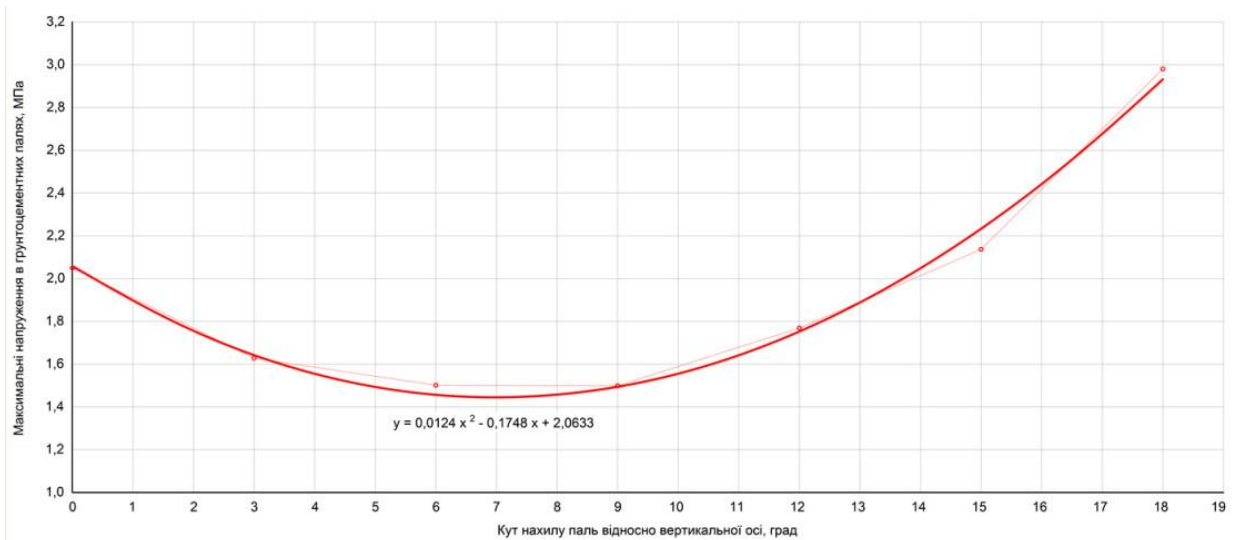


Рис. 5. Залежність максимальних напружень у ґрунтоцементних палях від кута нахилу палів відносно вертикальної осі

Fig. 5. Dependence of maximum stresses in soil-cement piles on the angle of inclination of piles relative to the vertical axis

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

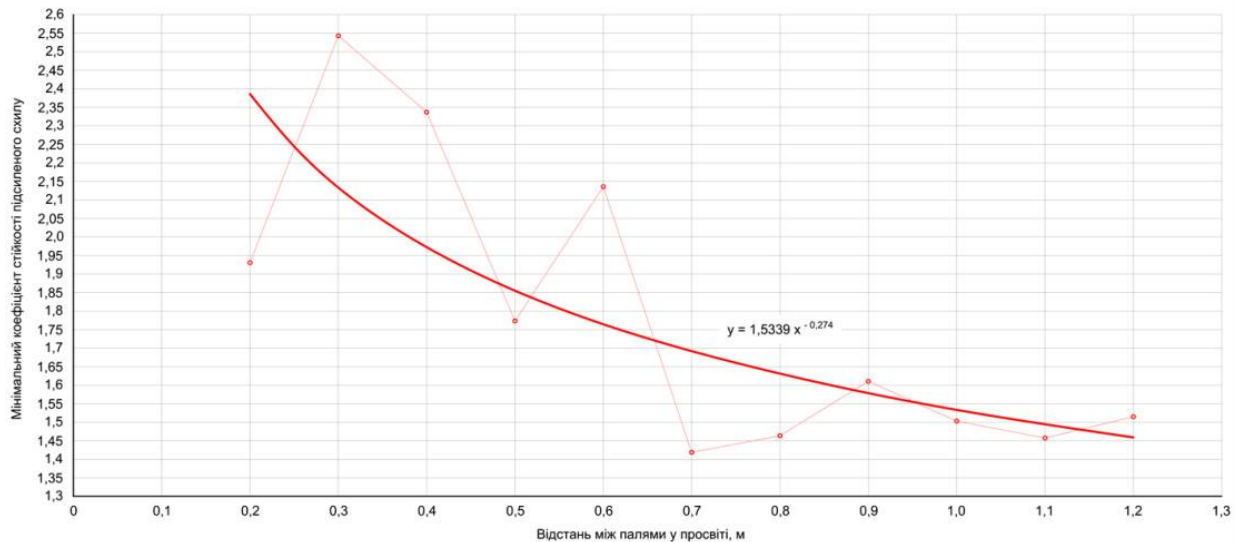


Рис. 6. Залежність мінімального коефіцієнта стійкості підсиленого схилу від відстані між палями у простві

Fig. 6. Dependence of the minimum strength coefficient of the reinforced slope on the distance between the piles in the gap

Наукова новизна та практична значимість

Уперше отримано закономірності формування міцності та стійкості ґрунтоцементної підпірної конструкції для укріплення зсувонебезпечних схилів, що дає можливість прогнозування їх геомеханічної стійкості залежно від можливого розташування кривої поверхні ковзання.

Уперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності та стійкості, а також напружень за Мізесом в елементах підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує.

Необхідно зазначити, що отримані результати дослідження являють собою узагальнений висновок щодо методу визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль. Розрахунок нелінійної задачі стійкості ґрунтових схилів, підсилених ґрунтоцементними палями, – складна задача, яка потребує великої кількості часу й розв'язання якої можливе лише за допомогою скінченно-елементного моделювання в програмних ком-

плексах із реалізацією моделювання нелінійної роботи матеріалів. У кожному окремому випадку для різних інженерно-геологічних умов отримані результати будуть відрізнятися від тих, які представлені в цій статті.

Висновки

Найбільш раціонально розташовувати ґрунтоцементні палі таким чином, щоб кут між ними відносно нормалі до кривої поверхні ковзання був 90 градусів. Зі збільшенням відстані між палями, яка має оптимальне значення, що становить близько 0,6 від діаметра паль, залежно від інженерно-геологічних умов може відбуватися зменшення ефективності роботи підпірної конструкції за рахунок неутримання частини ґрунту, що розташована між палями (у проміжку по всій довжині паль).

Один з основних принципів визначення та обґрунтування раціональних параметрів підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль полягає в тому, що довжина паль повинна бути такою, що перерізає поверхню ковзання на достатню глибину для утримання тіла зсуву. При цьому не менш важливим є кут нахилу паль відносно вертикальної осі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bromhead E. N. *The stability of slopes*. London and New York : Taylor & Francis, 2005. 411 p.
2. Croce P., Flora A., Modoni G. *Jet Grouting : Technology, Design and Control*. CRC Press, 2014. 448 p.
3. Covil C. S., Skinner A. E. Jet grouting : A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*. 1994. P. 605–627.
DOI: <https://doi.org/10.1680/gitg.19287.0041>
4. Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D., Kildieiev V. Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020>
5. Gariano S. L., Guzzettia F. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 162. P. 227–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
6. Greco V. R., Gulla G. Slope stability charts for slip surfaces of general shape. *5th International Symposium on Landslides*. 1988. P. 637–641.
7. Ihnatenko D. Y., Petrenko V. D., Tiutkin O. L. Interaction of soil-cement pile supporting structures with the body of a landslide. *Science and Transport Progress*. 2017. № 5 (71). P. 115–123.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/113619>
8. Kovrov O. S., Prychyna K. S. Slope stability assessment of hydraulic-fill soil dams and fill-up embankments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 6. P. 115–123.
9. Kovrov O., Kolesnik V., Buchavyy Yu. Evaluation of the influence of climatic and geomorphological factors on landslides development. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2018. Vol. 25. Iss. 1. P. 52–63.
DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.1.52-63>
10. Modoni G., Croce P., Mongiovi L. Theoretical modelling of jet grouting. *Géotechnique*. 2008. Vol. 58. Iss. 6. P. 533–535. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.5.335>
11. Petrenko V. D., Tiutkin O. L., Ihnatenko D. Y., Kovalchuk V. V. Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels : Theory, Research, Practice*. 2018. № 14. P. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/152921>

А. Л. ТЮТЬКИН^{1*}, Д. Ю. ИГНАТЕНКО²

^{1*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, эл. почта ihnatenkodmytro@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ НА ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНАХ

Цель. В статье предусмотрено разработать метод определения рациональных параметров подпорных конструкций из грунтоцементных свай на оползнеопасных склонах. **Методика.** Для достижения поставленной цели авторы выполнили сравнительные расчеты конечно-элементных моделей оползнеопасного слоистого склона с устройством подпорных конструкций из грунтоцементных свай: вертикальных, расположенных под углом к вертикальной оси, объединенных бетонным ростверком, без ростверка, различного диаметра, с разным расстоянием между сваями, но одинаковой длины, которая обусловлена расположением определенной по предварительным расчетам поверхности скольжения. **Результаты.** По результатам расчета контактной задачи взаимодействия грунтового массива и подпорной конструкции были получены закономерности формирования прочности и устойчивости оползнеопасного укрепленного склона, что дает возможность прогнозирования его геомеханической устойчивости в зависимости от возможного расположения кривой поверхности скольжения. Обоснован способ повышения коэффициента устойчивости почвенного склона в зависимости от вариации параметров грунтоцементной подпорной свайной конструкции. Численными расчетами обоснованы параметры грунтоцементных свайных подпорных конструкций – длина свай,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

диаметр свай, расстояние между сваями, угол их наклона и целесообразность объединения свай бетонным ростверком. **Научная новизна.** Впервые получены закономерности формирования прочности и устойчивости грунтоцементной подпорной конструкции для укрепления оползнеопасных склонов, что дает возможность прогнозирования их геомеханической устойчивости в зависимости от возможного расположения кривой поверхности скольжения. Также впервые установлены зависимости изменения абсолютных смещений, относительных деформаций, коэффициентов запаса прочности, устойчивости и напряжений по Мизесу в элементах подпорных конструкций из грунтоцементных свай от угла их наклона, расстояния между сваями и наличия бетонного ростверка, который их объединяет. Получили дальнейшее развитие методы оценки и прогнозирования оползнеопасности почвенных склонов, что позволило обосновать способ повышения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от вариации параметров грунтоцементной подпорной конструкции. Впервые обоснованы параметры способа повышения устойчивости оползнеопасных склонов со свайными подпорными конструкциями на основании комплексного математического и центробежного моделирования с использованием реальных почв оползнеопасного склона и критериев подобия. **Практическая значимость.** Авторы разработали и запатентовали метод укрепления оползнеопасных склонов с помощью грунтоцементных свай, объединенных бетонным ростверком, расположенных перпендикулярно вектору движения тела оползня.

Ключевые слова: грунтоцементные сваи; бетонный ростверк; конечно-элементное моделирование; оползнеопасный склон; коэффициент устойчивости склона

O. L. TIUTKIN^{1*}, D. Y. IHNATENKO²

^{1*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 442 36 63, e-mail ihnatenkodmytro@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS OF SUPPORTING STRUCTURES MADE OF SOIL-CEMENT PILES ON LANDSLIDE-PRONE SLOPES

Purpose. The article proposes a method for determining the rational parameters of supporting structures made of soil-cement piles on landslide-prone slopes. **Methodology.** To achieve this purpose, the authors performed comparative calculations of finite-element models of landslide-prone layered slope with the arrangement of supporting structures of soil-cement piles: vertical, located at an angle to the vertical axis, combined with a concrete grillage, without grillage, with different diameters, with different distances between piles, but of the same length, which is justified by the location determined by preliminary calculations of the sliding surface. **Findings.** According to the results of calculating the contact problem of the interaction of the soil mass and the supporting structure, the regularities of formation of strength and stability of the reinforced landslide-prone slope were obtained, which makes it possible to predict its geomechanical stability depending on the possible location of the sliding surface curve. The method of increasing the stability coefficient of the soil slope depending on the variation of the parameters of the soil-cement supporting pile structure is substantiated. Numerical calculations substantiate the parameters of soil-cement pile supporting structures – the length of the piles, their diameter, the distance between the piles, the angle of their inclination and the feasibility of combining the piles with a concrete grillage. **Originality.** For the first time, the formation regularities of strength and stability of soil-cement supporting structure for strengthening the landslide-prone slopes are obtained, which makes it possible to predict their geomechanical stability depending on the possible location of the sliding surface curve. For the first time, the dependences of changes in absolute displacements, relative deformations, coefficients of strength, stability, as well as Mises stresses in the elements of supporting structures of soil-cement piles on the angle of their inclination, distance between piles and the presence of a concrete grillage that joins them. Methods for assessing and predicting the landslide danger of soil slopes were further developed, which allowed to substantiate the method of increasing the strength coefficient depending on the variation of the parameters of the soil-cement supporting structure. For the first time, the parameters of the method of increasing the stability of landslide-prone slopes with pile supporting structures based on the complex mathematical and centrifugal

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

modeling using real landslides and similarity criteria are substantiated. **Practical value.** The authors have developed and patented a method of strengthening landslide slopes with the help of soil-cement piles, combined with a concrete grillage, located perpendicular to the movement vector of the landslide body.

Keywords: soil-cement piles; concrete grillage; finite element modeling; landslide slope; slope stability coefficient

REFERENCES

1. Bromhead, E. N. (2005). *The stability of slopes*. London and New York: Taylor & Francis. (in English)
2. Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press. (in English)
3. Covil, C. S., & Skinner, A. E. (1994). Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*, 605-627. DOI: <https://doi.org/10.1680/gitg.19287.0041> (in English)
4. Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., & Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020> (in English)
5. Gariano, S. L., & Guzzettia, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011> (in English)
6. Greco, V. R., & Gulla, G. (1988). Slope stability charts for slip surfaces of general shape. *5th International Symposium on Landslides* (pp. 637-641). (in Italian)
7. Ihnatenko, D. Y., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2017). Interaction of soil-cement pile supporting structures with the body of a landslide. *Science and Transport Progress*, 5(71), 115-123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/113619> (in English)
8. Kovrov, O. S., & Prychyna, K. S. (2017). Slope stability assessment of hydraulic-fill soil dams and fill-up embankments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 115-123. (in English)
9. Kovrov, O., Kolesnik, V., & Buchavyi, Yu. (2018). Evaluation of the influence of climatic and geomorphological factors on landslides development. *Environmental Safety and Natural Resources*, 25(1), 52-63. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.1.52-63> (in English)
10. Modoni, G., Croce, P., & Mongiovi, L. (2008). Theoretical modelling of jet grouting. *Géotechnique*, 58(6), 533-535. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.5.335> (in English)
11. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Y., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 14, 101-109. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/152921> (in English)

Надійшла до редколегії: 14.08.2020

Прийнята до друку: 15.12.2020

Тематичний покажчик журналу «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна» за 2020 рік

Назва статті	№ журналу	Стор.
Автоматизовані системи управління на транспорті		
<i>І. В. Жуковицький, І. О. Педенко</i> Аналіз безпеки бездротових мереж Wi-Fi в автоматизованих системах залізничного транспорту	4	7
Екологія та промислова безпека		
<i>М. М. Біляєв, О. В. Берлов, В. А. Козачина, І. В. Калашніков, О. В. Шевченко</i> Оцінка ризику термічного ураження людей на промисловому об'єкті в разі аварійного горіння твердого ракетного палива	1	7
<i>В. Д. Петренко, М. І. Нетеса, О. Л. Тют'їн, О. В. Громова, В. А. Козачина</i> Математичне моделювання очищення води у фільтрі	1	17
<i>Л. Ф. Долина, Ю. О. Ждан, Д. А. Долина</i> Очищення стічних вод в умовах космосу	1	7
<i>В. Д. Петренко, М. І. Нетеса, О. Л. Тют'їн, О. В. Громова, В. І. Шинкаренко, В. А. Козачина</i> Експрес модель для розрахунку процесу очищення води	2	16
<i>М. М. Біляєв, О. В. Берлов, В. В. Біляєва, В. А. Козачина, І. В. Калашніков</i> Аварійне горіння твердого ракетного палива: оцінка ризику ураження людей в робочому приміщенні	3	7
<i>М. В. Лемеш, М. М. Біляєв, Л. Г. Татарко, З. М. Якубовська</i> Моделювання процесу біологічного очищення стічних вод на базі камерних моделей	3	16
<i>М. М. Біляєв, М. В. Лемеш, В. В. Біляєва, П. Б. Машихіна, З. М. Якубовська</i> Комп'ютерне моделювання процесів біологічного очищення стічних вод в аеротенках із пластинами	5	5
<i>В. А. Козачина, О. В. Громова, О. Ю. Гунько, Л. Г. Татарко</i> Моделювання очищення стічних вод на базі CFD-моделі: експрес-розрахунок	5	15
<i>М. М. Біляєв, М. В. Лемеш, О. Ю. Гунько, В. О. Задоя, П. Б. Машихіна, З. М. Якубовська</i> 3D-моделювання біологічного очищення стічних вод в аеротенку	6	5
Економіка та управління		
<i>О. А. Ходоскіна, С. О. Кірпічева, А. О. Самсонова, Є. О. Швецова</i> Сучасні тенденції в розвитку транспортнологістичних систем	1	25
<i>Я. В. Літвінова, О. Д. Барановський</i> Пошук та обґрунтування шляхів підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів	5	22
<i>О. А. Ходоскіна, А. А. Іграєва, В. Є. Наумов</i> Результати й перспективи розвитку білорусько-китайської співпраці «економічний пояс шовкового шляху»	6	15
Експлуатація та ремонт засобів транспорту		
<i>В. В. Бурченков</i> Удосконалення технології роботи сортувальних станцій на основі дистанційного акустичного зондування	1	35
<i>С. В. Войтків</i> Методика оцінки рівня комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів	1	44
<i>М. І. Музикін</i>	2	24

Назва статті	№ журналу	Стор.
Дослідження інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків в умовах ризиків <i>Є. Б. Демченко, В. В. Малашкін, І. Я. Сковрон</i>	3	25
Дослідження параметрів залізничних станцій з використанням мереж Петрі <i>Д. М. Козаченко, О. Ю. Папахов, Ю. М. Германюк</i>	3	37
Розвиток методів організації вагонопотоків у російській імперії та СРСР <i>В. І. Мацюк, В. К. Мироненко, Я. П. Петінов</i>	3	62
Концепція регламенту доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування <i>Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Є. Б. Боднар, Д. В. Бобир, М. В. Очеретнюк</i>	5	89
Дослідження впливу системи обслуговування тепловозів на організацію роботи локомотивного депо <i>Н. М. Санницький, Ю. М. Германюк, Т. О. Шаргун</i>	6	23
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси		
<i>А. М. Муха, Д. В. Устименко</i>		
Методика оцінки нагрівання місця контакту контактного проводу із вставкою струмоприймача <i>А. О. Сулим, П. О. Хозя</i>	4	22
Удосконалення методології визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для поїзда метрополітену	5	45
Залізнична колія та автомобільні дороги		
<i>С. В. Воронін, Б. С. Асадов, В. О. Стефанов, Д. В. Онопрейчук, О. О. Губін</i>		
Аналіз розвитку основних дефектів і теоретичне прогнозування ресурсу рейок в умовах мащення <i>В. Йовер, Л. Гаспар, С. Фішер</i>	2	35
Дослідження погіршення геометрії трамвайних колій <i>Д. М. Курган, О. В. Губар, М. О. Гаврилов</i>	2	46
Методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейку <i>Р. Чепке</i>	3	71
Аналіз взаємодії в системі колесо – рейка по кривих малого радіуса	4	36
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання		
<i>В. В. Скалозуб, Л. О. Панік, О. Д. Панарін</i>		
Уніфікований паралельний алгоритм та програмний комплекс оптимального планування неоднорідних потоків у мережах <i>В. М. Пахомова, Д. І. Назарова</i>	1	56
Організація бездротової мережі на сортувальній станції з використанням бджолиного методу <i>В. М. Пахомова, М. С. Коннов</i>	2	60
Дослідження двох підходів до виявлення мережних атак із використанням нейромережної технології <i>Ю. О. Давідіч, І. В. Чумаченко, А. С. Галкін, Н. В. Давідіч, Є. І. Куш</i>	3	81
Інформаційний підхід до визначення маршрутів руху водія транспортних засобів у містах <i>В. В. Скалозуб, В. М. Ільман, Б. Б. Білий</i>	4	51
Конструктивні багатопарові моделі для впорядкування послідовностей з урахуванням складності операцій формування <i>І. В. Жуковицький, В. М. Пахомова, Д. О. Остапеч, О. І. Циганок</i>	4	61
Виявлення атак на комп'ютерну мережу на основі використання комплексу нейронних мереж	5	68

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>Л. С. Коряшкіна, Г. В. Симонець</i> Застосування алгоритмів машинного навчання для обробки коментарів під навчальним матеріалом на відеохостингу «YouTube»	6	33
Матеріалознавство		
<i>В. В. Нетребко</i> Вплив хімічного складу зносостійкого чавуну на міжфазне розподілення марганцю після відпалу за 690 °С	1	68
<i>О. Плітченко, М. М. Грищенко</i> Дослідження умов розвитку структурних перетворень під час зварювання тертям із перемішуванням багатофазового алюмінієвого сплаву	1	77
<i>І. О. Вакуленко, Д. М. Болотова, С. В. Пройдак, Х. Аскеров, Х. Куг, А. О. Чайковська</i> Формування структури вуглецевої сталі під час гарячої пластичної деформації.	1	94
<i>О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький, С. В. Гайдук</i> Математичне прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів	4	77
<i>В. І. Зурнаджи, В. С. Волошин, Р. О. Кусса, В. Г. Єфременко, А. В. Джеренова, О. В. Цветкова</i> Сучасні конструкційні сталі із TRIP-ефектом	5	80
<i>О. М. Серенко, І. В. Захарова</i> Визначення залишкових напружень у покриттях, отриманих методом дугової металізації з пульсуючим розпилувальним потоком	5	93
<i>І. О. Бондаренко, Л. О. Недужа</i> Проблема відсутності даних про поведінку матеріалів для оцінки ризику	6	43
Машинобудування		
<i>Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк</i> Кінематичний синтез прямолінійнонапрямних центральних кривошипноповзункових механізмів захоплювального пристрою за енергетичним індексом передачі руху	1	88
<i>П. М. Гащук, С. В. Нікіпчук</i> Ефективність робочих циклів двигуна швидкого внутрішнього згорання з подовженим робочим ходом	3	105
<i>Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк</i> Пошук та усунення повторюваних зв'язків у схемі напрямного кривошипноповзункового механізму захоплювального пристрою	3	129
Рухомий склад і тяга поїздів		
<i>В. Г. Равлюк, І. М. Афанасенко, М. Г. Равлюк</i> Дослідження геометричних параметрів гальмових колодок вантажних вагонів за шкідливого зносу	1	99
<i>А. О. Швець</i> Стійкість вантажних вагонів у разі дії стискних поздовжніх сил	1	119
<i>В. Г. Равлюк, М. Г. Равлюк, І. К. Кириченко</i> Статистичне опрацювання параметрів зносу гальмових колодок вантажних вагонів	2	74
<i>О. В. Фомін, А. О. Ловська</i> Визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб	2	92
<i>А. О. Швець</i> Визначення стійкості вантажних вагонів з урахуванням параметрів залізничної колії	2	103

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>М. О. Булах</i> Аналіз компоновальних схем спальних вагонів	3	138
<i>С. В. Войтків</i> Визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб	3	147
<i>В. В. Лагута, Ю. Г. Козік</i> Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції тягового електродвигуна ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги	3	163
<i>В. Г. Равлюк</i> Удосконалення стенда для комплексного діагностування вузлів вантажних вагонів	4	86
<i>О. В. Фомін, А. О. Ловська, М. І. Горбунов, Ю. В. Фоміна</i> Визначення поздовжньої навантаженості несучої конструкції вагона-платформи, завантаженого контрейлером	4	103
<i>О. В. Шатунов, А. О. Швець</i> Динаміка зчепу вагонів-платформ під час перевезення довгомірного вантажу.	4	114
<i>Ю. В. Зеленько, Д. М. Зеленько, Л. О. Недужа</i> Вивчення негативного впливу нафтопродуктів на металеві елементи залізничної інфраструктури	5	105
<i>В. Г. Равлюк, М. Г. Равлюк, І. К. Кириченко, Н. Ю. Ламнауер, А. К. Мельничук</i> Імовірносно-статистична модель зносу гальмових колодок вантажних вагонів	5	116
<i>С. В. Ракиша, П. Г. Анофрієв, О. С. Куроп'ятник</i> Визначення та аналіз технічних параметрів стенда для комплексних випробувань залізничних коліс	5	134
<i>А. О. Швець</i> Динаміка взаємодії деяких типів вантажних вагонів з залізничною колією	5	142
<i>Є. В. Горобець</i> Аналіз динаміки зносу несучих конструкцій маневрових тепловозів промислового залізничного транспорту під впливом корозії матеріалу	6	57
<i>А. О. Швець</i> Вплив на динаміку вантажних вагонів поперечного зміщення візків	6	66
Транспортне будівництво		
<i>Д. В. Розуменко, Д. О. Банніков</i> Динамічні властивості одноповерхової виробничої будівлі	1	138
<i>А. В. Радкевич, Т. В. Ткач, К. М. Нетеса</i> Розробка алгоритму вибору раціональної фасадної системи багатоповерхових будівель	6	82
<i>О. Л. Тютькін, Д. Ю. Ігнатенко</i> Визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечних схилах	6	97

Subject index to the journal «Nauka ta Progres Transportu. Visnik
Dnipropetrovs'kogo Nacional'nogo Universitetu Zalizničnogo Transportu =
Science and Transport Progress» for 2020

Article title	Journal number	Page
Automated and Telematic Systems on Transport		
<i>I. V. Zhukovyts'kyi, I. A. Pedenko</i> Wireless Wi-Fi Security Analysis in Automated Railway Systems	4	7
Ecology and Industrial Safety		
<i>M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, V. A. Kozachyna, I. V. Kalashnikov, O. V. Shevchenko</i> Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency burning solid propellant	1	7
<i>V. D. Petrenko, M. I. Netesa, O. L. Tiutkin, O. V. Gromova, V. A. Kozachyna</i> Mathematical modeling of water purification with filter	1	17
<i>L. F. Dolyna, Y. O. Zhdan, D. A. Dolyna</i> Waste water treatment in space conditions	2	7
<i>V. D. Petrenko, M. I. Netesa, O. L. Tiutkin, O. V. Gromova, V. A. Kozachyna</i> Express model for water treatment process calculation	2	16
<i>M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, V. V. Biliaieva, V. A. Kozachyna, I. V. Kalashnikov</i> Emergency burning of solid rocket propellant: damage risk assessment to people in the workplace	3	7
<i>M. V. Lemesh, M. M. Biliaiev, L. H. Tatarko, Z. M. Yakubovska</i> Modeling of the process of biological wastewater treatment based on chamber models	3	16
<i>M. M. Biliaiev, M. V. Lemesh, V. V. Biliaieva, P. B. Mashykhina, Z. M. Yakubovska</i> Computer simulation of biological wastewater treatment processes in aerotanks with plates	5	5
<i>V. A. Kozachyna, O. V. Hromova, O. Y. Hunko, L. H. Tatarko</i> Simulation of waste water treatment based on CFD model: express calculation	5	15
<i>M. M. Biliaiev, M. V. Lemesh, O. Y. Gunko, V. O. Zadoia, P. B. Mashykhina, Z. M. Yakubovska</i> 3D modeling of biological wastewater treatment in aeration tank	6	5
Economics and Management		
<i>O. A. Hodoskina, S. A. Kirpicheva, A. A. Samsonova, E. A. Shvetsova</i> Modern trends in the development of transport and logistics systems	1	25
<i>Y. V. Litvinova, O. D. Baranovsky</i> Search and justification of ways to increase the unitized cargo transportation efficiency	5	22
<i>O. A. Khodoskina, A. A. Igraieva, V. Y. Naumova</i> Results and prospects for the development of the Belarusian-Chinese cooperation the silk road economic belt	6	15
Operation and Repair of Transport Means		
<i>V. V. Burchenkov</i> Improving the technology of work of marshalling yards based on remote acoustic sounding	1	35
<i>S. V. Voytkiv</i> Assessment methodology of comfort level of passenger compartment sleeping cars	1	44
<i>M. I. Muzykin</i> Research of motion intensity of specialized train traffic volumes under risks conditions	2	24
<i>Y. B. Demchenko, V. V. Malashkin, I. Y. Skovron</i> Investigation of the parameters of railway stations using petri nets	3	25

Article title	Journal number	Page
<i>D. M. Kozachenko, O. Y. Papakhov, Y. N. Hermaniuk</i> Development of car traffic volumes organization methods in the Russian Empire and in the USSR	3	37
<i>V. I. Matsiuk, V. K. Myronenko, Y. P. Petinov</i> Concept of regulations for access of private locomotives to public railway infrastructure	3	62
<i>B. Y. Bodnar, O. B. Ochkasov, Y. B. Bodnar, D. V. Bobyr, M. V. Ocheretniuk</i> Research of influence of locomotive service system on the operation organization of locomotive depot	4	32
<i>N. M. Sannytskyi, Y. M. Hermaniuk, T. O. Sharhun</i> Development of a method for assigning private locomotives to trains	6	23
Electric Transport, Power Systems and Complexes		
<i>A. M. Mukha, D. V. Ustymenko</i> Estimation methodology of heating the contact place of contact wire with contact strip of pantograph	4	22
<i>A. O. Sulym, P. O. Khozia</i> Improvement of the methodology for rational parameters determination of the capacitive energy storage for the metro train	5	45
Railroad and Roadway Network		
<i>S. V. Voronin, B. S. Asadov, V. O. Stefanov, D. V. Onopreichuk, O. O. Gubin</i> Development analysis of main defects and theoretical forecast of rail service life in the conditions of lubrication	2	35
<i>V. Jover, L. Gaspar, S. Fischer</i> Investigation of geometrical deterioration of tramway tracks	2	46
<i>D. M. Kurhan, O. V. Hubar, M. O. Havrilov</i> Methodology for engineering calculation of stability coefficient against wheel climbing on the rail	3	71
<i>R. Csépké</i> Analysis of rail-wheel interaction in curves with small radii	4	36
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling		
<i>V. V. Skalozub, L. A. Panik, A. D. Panarin</i> Unified parallel algorithm and programming complex of optimal planning of non-uniform flows in the networks	1	56
<i>V. M. Pakhomova, D. I. Nazarova</i> Organizing wireless network at marshalling yards using the bee method	2	60
<i>V. M. Pakhomova, M. S. Konnov</i> Research of two approaches to detect network attacks using neural network technologies	3	81
<i>Y. O. Davidich, I. V. Chumachenko, A. S. Galkin, N. V. Davidich, Y. I. Kush</i> Information approach to determining the traffic route by vehicles drivers in cities	4	51
<i>V. V. Skalozub, V. M. Ilman, B. B. Bilyi</i> Constructive multi-layer models for ordering a set of sequences, taking into account the complexity operations of formation	4	66
<i>I. V. Zhukovyts'kyi, V. M. Pakhomova, D. O. Ostapets, O. I. Tsyhanok</i> Detection of attacks on a computer network based on the use of neural networks complex	5	68
<i>L. S. Koriashkina, H. V. Symonets</i> Application of machine learning algorithms for processing comments from the YouTube video hosting under training videos	6	33
Material Science		
<i>V. V. Netrebko</i> The influence of the chemical composition of wear-resistant cast iron on the interphase distribution of mn after annealing at 690°C	1	68

Article title	Journal number	Page
<i>S. O. Plitchenko, M. M. Grischenko</i> Research of development conditions of structural transformations during friction stir welding of multiphase aluminum alloy	1	77
<i>I. O. Vakulenko, D. M. Bolotova, S. V. Proidak, H. Askerov, H. Cug, H. O. Tchaikovska</i> Formation of carbon steel structure during hot plastic deformation	3	94
<i>O. A. Hlotka, V. Y. Olshanetskyi, S. V. Haiduk</i> Mathematical prediction of the properties of heat-resistant nickel alloys	4	77
<i>V. I. Zurnadzhy, V. S. Voloshyn, R. A. Kussa, V. G. Efremenko, A. V. Dzherenova, O. V. Tsvetkova</i> Modern structural steels with trip-effect	5	80
<i>O. M. Serenko, I. V. Zakharova</i> Detection of residual stresses in coatings obtained by the method of arc metallization with a pulsating spraying flow	5	93
<i>I. O. Bondarenko, L. O. Neduzha</i> The problem of a lack of material behaviour data for risk assessment	6	43
Mechanical Engineering		
<i>R. P. Pogrebnyak, M. R. Pohrebniak</i> Kinematic synthesis of the guide bearing central slide-crank mechanism of the gripping device based on the energetic motion transmission index	1	88
<i>P. M. Hashchuk, S. V. Nikipchuk</i> The efficiency of working cycles in the rapid internal combustion engine with the extended working stroke	3	105
<i>R. P. Pogrebnyak, M. R. Pohrebniak</i> Search and elimination of repeated connections in the scheme of guiding slidecrank mechanism of the gripping device	3	129
Rolling Stock and Train Traction		
<i>V. G. Ravlyuk, I. M. Afanasenko, M. G. Ravliuk</i> Investigation of the geometric parameters of the brake pads of freight cars under hazardous wear	1	99
<i>A. O. Shvets</i> Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces	1	119
<i>V. G. Ravlyuk, M. G. Ravliuk, I. K. Kirichenko</i> Statistical processing of brake pads wear parameters of freight cars	2	74
<i>O. V. Fomin, A. O. Lovska</i> Strength determination of load-bearing structure of articulated flatcar of round pipes	2	92
<i>A. O. Shvets</i> Determination of the stability of freight cars taking into account the railway track parameters	2	103
<i>M. O. Bulakh</i> Improving the methodology for assessing the train traffic safety at the railway	3	138
<i>S. V. Voytkiv</i> Analysis of layout schemes of sleeping cars	3	147
<i>V. V. Laguta, Y. H. Kozik</i> Determination of a restoration periods of a frame insulation of TM ED-118A by recovery voltage observations	3	163
<i>V. H. Ravliuk</i> Improvement of the stand for comprehensive diagnosis of freight car assemblies	4	86
<i>O. V. Fomin, A. O. Lovska, M. I. Horbunov, Yu. V. Fomina</i> Determination of the longitudinal load of supporting structure of the flat car loaded with a piggyback	4	103
<i>O. V. Shatunov, A. O. Shvets</i> Flat cars coupling dynamics when transporting long cargo	4	114

Article title	Journal number	Page
<i>Y. V. Zelenko, D. M. Zelenko, L. O. Neduzha</i> Study of negative influence of petroleum products on metal elements of railway infrastructure	5	105
<i>V. H. Ravliuk, M. H. Ravliuk, I. K. Kyrychenko, N. Y. Lamnauer, A. K. Melnychuk</i> Probability and statistical model of wearing of brake pads of freight cars	5	116
<i>S. V. Raksha, P. H. Anofriiev, O. S. Kuropiatnyk</i> Determination and analysis of technical parameters of the bench for railway wheels complex tests	5	134
<i>A. O. Shvets</i> Interaction dynamics of some types of freight cars with a railway track	5	142
<i>Y. V. Horobets</i> Wear dynamics analysis of the supporting structures of shunting locomotives of industrial railway transport under the influence of material corrosion	6	57
<i>A. O. Shvets</i> Influence of lateral displacement of bogies on the freight car dynamics	6	66
Transport Construction		
<i>D. V. Rozumenko, D. O. Bannikov</i> Dynamic properties of one-storey industrial building	1	138
<i>A. V. Radkevych, T. V. Tkach, K. M. Netesa</i> Development of algorithm for choosing a rational facade system of multi-storey buildings	6	83
<i>O. L. Tiutkin, D. Y. Ihnatenko</i> Determination of rational parameters of supporting structures made of soil-cement piles on landslide-prone slopes	6	97

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, М. В. ЛЕМЕШ, О. Ю. ГУНЬКО,
В. О. ЗАДОЯ, П. Б. МАШИХІНА, З. М. ЯКУБОВСЬКА**
ЗД-МОДЕЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ
СТІЧНИХ ВОД В АЕРОТЕНКУ 5

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

О. А. ХОДОСКІНА, А. А. ІГРАЄВА, В. Є. НАУМОВ
РЕЗУЛЬТАТИ Й ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ
БІЛОРУСЬКО-КИТАЙСЬКОЇ СПІВПРАЦІ
«ЕКОНОМІЧНИЙ ПОЯС ШОВКОВОГО ШЛЯХУ» 15

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Н. М. САННИЦЬКИЙ, Ю. М. ГЕРМАНИЮК,
Т. О. ШАРГУН**
РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗАКРІПЛЕННЯ ПРИВАТНИХ
ЛОКОМОТИВІВ ЗА ПОЇЗДАМИ..... 23

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Л. С. КОРЯШКІНА, Г. В. СИМОНЕЦЬ
ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО
НАВЧАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ КОМЕНТАРІВ ПІД
НАВЧАЛЬНИМ МАТЕРІАЛОМ НА ВІДЕОХОСТИНГУ
«YOUTUBE»..... 33

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

І. О. БОНДАРЕНКО, Л. О. НЕДУЖА
ПРОБЛЕМА ВІДСУТНОСТІ ДАНИХ ПРО ПОВЕДІНКУ
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ 43

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Є. В. ГОРОБЕЦЬ
АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗНОСУ НЕСУЧИХ
КОНСТРУКЦІЙ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ
ПРОМИСЛОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ПІД
ВПЛИВОМ КОРОЗІЇ МАТЕРІАЛУ 57

А. О. ШВЕЦЬ
ВПЛИВ НА ДИНАМІКУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ
ПОПЕРЕЧНОГО ЗМІЩЕННЯ ВІЗКІВ..... 66

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

А. В. РАДКЕВИЧ, Т. В. ТКАЧ, К. М. НЕТЕСА
РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОЇ
ФАСАДНОЇ СИСТЕМИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ
БУДІВЕЛЬ 82

О. Л. ТЮТЬКІН, Д. Ю. ІГНАТЕНКО
ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ
ПАЛЬ НА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛАХ 97

ТЕМАТИЧНИЙ ПОКАЖЧИК ЖУРНАЛУ
«НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ»
ЗА 2020 РІК 106

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

- M. M. BILIAIEV, M. V. LEMESH, O. Y. GUNKO,
V. O. ZADOIA, P. B. MASHYKHINA,
Z. M. YAKUBOVSKA**
3D MODELING OF BIOLOGICAL WASTEWATER
TREATMENT IN AERATION TANK 5

ECONOMICS AND MANAGEMENT

- O. A. KHODOSKINA, A. A. IGRAIEVA,
V. Y. NAUMOVA**
RESULTS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT
OF THE BELARUSIAN-CHINESE COOPERATION
THE SILK ROAD ECONOMIC BELT 15

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

- N. M. SANNYTSKYI, Y. M. HERMANIUK,
T. O. SHARHUN**
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSIGNING
PRIVATE LOCOMOTIVES TO TRAINS 23

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

- L. S. KORIASHKINA, H. V. SYMONETS**
APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS
FOR PROCESSING COMMENTS FROM THE YOUTUBE
VIDEO HOSTING UNDER TRAINING VIDEOS 33

MATERIAL SCIENCE

- I. O. BONDARENKO, L. O. NEDUZHA**
THE PROBLEM OF A LACK OF MATERIAL
BEHAVIOUR DATA FOR RISK ASSESSMENT 43

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

- Y. V. HOROBETS**
WEAR DYNAMICS ANALYSIS OF THE SUPPORTING
STRUCTURES OF SHUNTING LOCOMOTIVES
OF INDUSTRIAL RAILWAY TRANSPORT UNDER
THE INFLUENCE OF MATERIAL CORROSION 57

- A. O. SHVETS**
INFLUENCE OF LATERAL DISPLACEMENT OF BOGIES
ON THE FREIGHT CAR DYNAMICS 66

TRANSPORT CONSTRUCTION

- A. V. RADKEVYCH, T. V. TKACH, K. M. NETESA**
DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR CHOOSING
A RATIONAL FACADE SYSTEM OF MULTI-STOREY
BUILDINGS 82

- O. L. TIUTKIN, D. Y. IHNATENKO**
DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS
OF SUPPORTING STRUCTURES MADE
OF SOIL-CEMENT PILES ON LANDSLIDE-PRONE
SLOPES 97

- SUBJECT INDEX TO THE JOURNAL «NAUKA TA
PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK
DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO
UNİVERSITETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU =
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS»
FOR 2020.....110**

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;

4) Оригінал експертного висновку.

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:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 6 (90) 2020

(українською, російською 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. 13,72. Тираж 100 пр. Зам. №02/06

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.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.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 6 (90) 2020

(in Ukrainian, Russian 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 13,72. Circulation 100. Order no. 02/06

Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

